HIAST

الجمهورية العربية السورية

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا


# تصنيع خلائط حديد نيكل بطريقة تلبيد المساحيق ودراسة خصائصها المغنطيسية

دراسة أُعدَّت لنيل درجة الماجستير في علوم وهندسة المواد

اختصاص تعدين


إعداد

**أنس حبي**

إشراف

**د. مصطفى العليوي** **د. أحمد التونسي**


2015 - 2016

# المحتويات


**1 دراسة الخواص المغنطيسية لخلائط الحديد 1**
1.1 منشأ المغنطيسية في المواد . . . . . . . . 1
2.1 أنواع المواد المغنطيسية . . . . . . . . 2
1.2.1 المواد ذات المغنطة العكسية . . . . . . . . 2
2.2.1 المواد ذات المغنطة المُسايرة . . . . . . . . 3
3.2.1 المواد المغنطيسية اللاحديدية . . . . . . . . 4
4.2.1 المواد المغنطيسية اللينة . . . . . . . . 5
1.4.2.1 المواد الفيري مغنطيسية . . . . . . . . 5
2.4.2.1 المواد الفيرومغنطيسية (المغنطة الحديدية) . . . . . . . . 5
5.2.1 المناطق الفيرومغنطيسية . . . . . . . . 6
3.1 أنواع المواد الفيرومغنطيسية . . . . . . . . 8
1.3.1 المواد الفيرومغنطيسية اللينة . . . . . . . . 8
2.3.1 المواد الفيرومغنطيسية القاسية . . . . . . . . 8
4.1 مُنحني المغنطة الإبتدائي . . . . . . . . 9
5.1 حلقة البطاء . . . . . . . . 9
6.1 كيفية إزالة مغنطة مادة فيرومغنطيسية . . . . . . . . 12
7.1 أليات إنقلاب المغنطة . . . . . . . . 12
1.7.1 الإنزتروبية المغنطيسية . . . . . . . . 12
2.7.1 التخصر المغنطيسي . . . . . . . . 14
8.1 الحث الذاتي . . . . . . . . 14
9.1 الحث المُتبادل بين الملفين . . . . . . . . 15
10.1 قانون أمبير . . . . . . . . 16
11.1 قياس الخواص المغنطيسية . . . . . . . . 16
12.1 مُخطط الأطوار للحديد . . . . . . . . 17
13.1 مُخطط الأطوار للحديد– نيكل . . . . . . . . 17
14.1 درجة حرارة كوري . . . . . . . . 17
15.1 الفرق بين التحولات الطورية والمغنطيسية . . . . . . . . 17
16.1 خلائط الحديد وخصائصها المغنطيسية . . . . . . . . 18
1.16.1 الحديد النقي . . . . . . . . 19
2.16.1 الخليطةFe36Ni . . . . . . . . 19
3.16.1 الخليطةFe50Ni . . . . . . . . 19
4.16.1 الخليطةFe80Ni . . . . . . . . 20
17.1 العيوب البلورية . . . . . . . . 20
1.17.1 أنواع العيوب البلورية . . . . . . . . 20
1.1.17.1 العيوب النقطية . . . . . . . . 20
2.1.17.1 العيوب خطية . . . . . . . . 20

2.17.1 تأثير الشوائب على الخواص المغنطيسية . . . . . . . . . . . . . . . . 22
3.17.1 تأثير المسامية على الخواص المغنطيسية . . . . . . . . . . . . . . . . . 25
4.17.1 تأثير الإجهادات على الخواص المغنطيسية . . . . . . . . . . . . . . . 26
18.1 الأنواع المُختلفة للمحولات . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 26
19.1 الأخطاء الناتجة عن قياس الخواص المغنطيسية للحلقة والتي يجب تجنبها . . . . . . . . . 32
20.1 الضياعات المغنطيسية . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 34
21.1 أثر القشرة . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 35

# الفصل 1

# دراسة الخواص المغنطيسية لخلائط الحديد

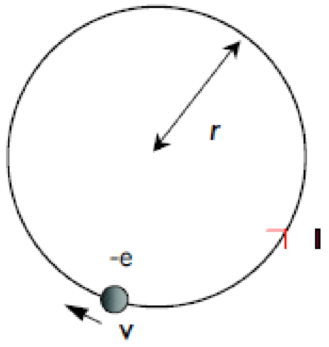
## 1.1 منشأ المغنطيسية في المواد

يُمكن تفسير نشؤ المغنطيسية في المواد نتيجة حركة الشحنات داخل ذرات المادة والتي يُمكن تصنيفها في ثلاثة أنواع:

أولاً: دوران الإلكترونات حول نواة الذرة:

يُشبه هذا الدوران مرور تيار كهربائي في حلقة مغلقة فيولد حقلا مغنطيسياً حولها هو الذي يعطي ذرات المادة الشكل 1.1 () خصائص مغنطيسية، وتتغير جهة هذا الحقل بتغير جهة دوران الإلكترون [13] .

فإذا دار إلكترونان حول النواة في الذرة بسرعتين زاويتين متساويتين وباتجاهين مُتعاكسين وبنصف قطر مدار واحد تولد عن إحداهُما خاصة مغنطيسية تلغي الخاصة المغنطيسية المتولدة عن الآخر، أما إذا انفرد أحد إلكترونات الذرة بدورانه حول النواة في الذرة أكسبها صفة مغنطيسية جاعلاً من الذرة مغنطيساً صغيراً ثُنائي القطب [13] .




الشكل 1.1: دوران الإلكترون حول نواة الذرة.

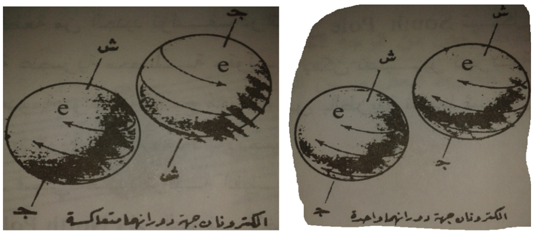
ثانياً: دوران الإلكترون حول محوره:

الذي يُعتبر كتيار متناه في الصغر يولد حقلا مغنطيسياً كما لو كان مغنطيسياً صغيراً، وهناك اتجاهان لدوران الإلكترون حول محوره يُعتبر الأول موجباً والثاني سالباً، فإذا دار إحداهُما حول محوره باتجاه معاكس لدوران الأخر الشكل() ألفا زوجاً مُتعاكساً بالدوران يُلغي إحداهُما الخصائص المغنطيسية للآخر. أما إذا انفرد الإلكترون بدورانه حول نفسه أكسب الذرة صفة مغنطيسية كما في الشكل() [13] .

ثالثاً: حركة بعض الشحنات داخل نواة الذرة:

تولد حركة بعض الشحنات داخل نواة الذرة خاصة مغنطيسية أيضاً، ولكن بقيمة ضئيلة لا تتجاوز 1/1000 من الخاصة المغنطيسية المتولدة عن الدورانين السابقين للإلكترونات [13] .

إن الخصائص المغنطيسية المتولدة عن الحركات الثلاثة السابقة تكون ثُنائيات مغنطيسية بشكل فوضوي (عشوائي)



(a) (b)

الشكل 2.1: (a) الكترونان جهة دورانهما مُتعاكسة. (b) الكترونان جهة دورانهما واحدة [13].

مُحصلتها معدومة قبل التمغنط، ويكون تأثير الحقل المغنطيسي المُسبب للتمغنط هو الذي جعل المُحصلة غير معدومة [13] .

فمثلاً يظهر في ترتيب الإلكترونات في ذرة الحديد أن أربعة إلكترونات فردية وحيدة الدوران في الطبقة $M$ تتشابه في اتجاه دورانها حول محورها مما يولد مغانط ثُنائية القطب، و عندما توضع في حقل مغنطيسي خارجي و تدور حول محورها وتصطف في اتجاه واحد هو اتجاه الحقل المُمغنط.

# 2.1 أنواع المواد المغنطيسية

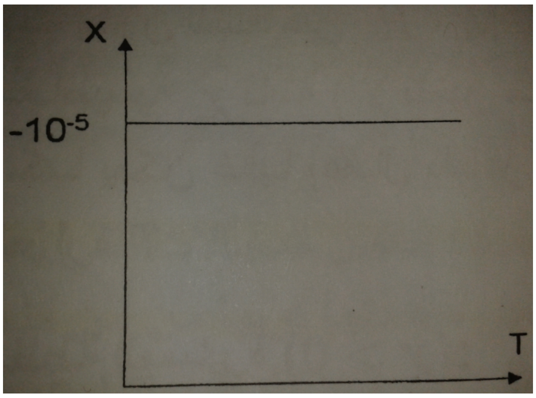
## 1.2.1 المواد ذات المغنطة العكسية

تنشأ المواد ذات المغنطة العكسية عن العزم المغنطيسي للذرة الحرة الذي ينشأ من تغير العزم المداري للإلكترون عند تطبيق حقل مغنطيسي خارجي [?] .

يكون الشعاعان $\overrightarrow{H}$ ، $\overrightarrow{M}$ لهذه المواد لهُما نفس المنحى ولكنهما مُتعاكسان في الاتجاه، حيث إن العزم المغنطيسي M ينعدم بانعدام الحقل المغنطيسي في الأوساط عكسية المغنطة [?].

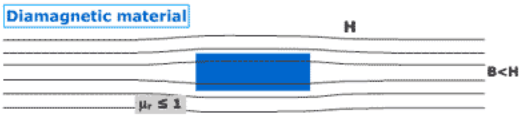
لذا يُمكننا أن نقول أن تأثير الحقل المغنطيسي على الحركة المدارية للإلكترون هو الذي يولد الطواعية المغنطيسية وتكون الطواعية لهذه المواد أصغر من الصفر ($\chi < 0$) وتكون قيمتها صغيرة ($\chi = -10^{-5}$) كما في الشكل (). وباعتبار أن هذه المواد تكتسب مغنطة صغيرة جداً، لذا يُمكن غالباً إهمال ظاهرة المغنطة هذه، حيث تكون نفاذيتها أقل من الواحد [?] [?]. حيث يُقصد بالنفاذية: بأنها قدرة المادة للتمغنط بسهولة أي هي قدرتها على إعادة ترتيب ذراتها بما يتوافق مع الحقل الخارجي.

ويلاحظ في حالة المواد ذات المغنطة العكسية أن الخواص المغنطيسية لا تتأثر بتغير درجة الحرارة لذلك لا تتعلق الطواعية المغنطيسية بدرجة الحرارة T .




الشكل 3.1: الطواعية المغنطيسية بدلالة درجة الحرارة للمواد ذات المغنطة العكسية [?].

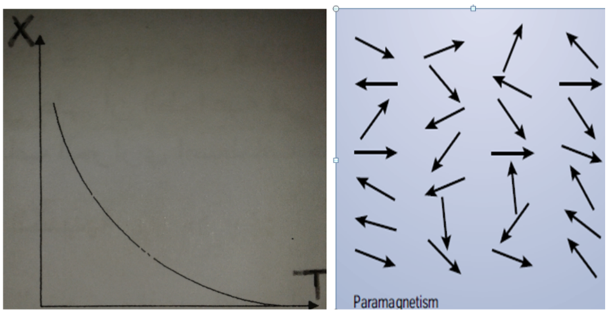
من الأمثلة على هذه المواد:
في الأجسام الصلبة التي تكون فيها الطبقات الإلكترونية مُمتلئة، أشهر الأمثلة التي تُحقق ذلك بلورات الغازات النادرة $(He, Ne, Ar)$ والبلورات الأيونية$(Cl^{-1}, Ca^{2+}, Na^{+})$ [?].
حيث عند وضع قطعة من مادة ذات مغنطة عكسية على شكل قضيب أمام حقل مغنطيسي فإنهُ يعمل على تفريق خطوط الحقل المغنطيسي، كما في الشكل () [?].




الشكل 4.1: تفرق خطوط الحقل المغنطيسي عند وضع قطعة من مادة ذات مغنطة عكسية.

### 2.2.1 المواد ذات المغنطة المُسايرة

تنشأ المواد ذات المغنطة المُسايرة عن العزم المغنطيسي للذرة الحرة الذي ينشأ من وجود سبين لكُل إلكترون، وكذلك وجود عزم اندفاع خطي مداري لكل إلكترون (اندفاع زاوي مداري) يرتبط بحركته حول النواة [?] [?].
يكون الشعاعان $\overrightarrow{M}$ ، $\overrightarrow{H}$ لهذه المواد لهما نفس المنحى ونفس الاتجاه، حيث إن هذه المواد تأخذ قيماً مُنخفضة للتحريض بنفس اتجاه الحقل، كما تكون النفاذية أكبر من الواحد $(\mu > 1)$ و الطواعية لهذه المواد أكبر من الصفر $(\chi > 0)$ حيث قيمتها تقريباً ضمن المجال $(\chi = 10^{-}2)$، حيث يُمكن غالباً إهمال ظاهرة التمغنط في هذه الحالة.
عندما $T > T_c$ تكون العزوم المغنطيسية تتجه بشكل عشوائي وهذا يؤدي إلى انعدام شُعاع التمغنط $\overrightarrow{M}$ ، والجسم عندها ذات مغنطة مُسايرة.
يدل قانون كوري التجريبي، على أن الطواعية في هذه المواد تتناسب عكساً مع درجة الحرارة المُطلقة (يُخرب الإصطفاف الحراري عزوم السبين) كما في الشكل () [?]. من الأمثلة على هذه المواد:

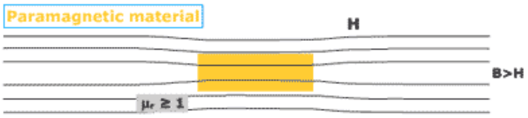



(a) (b)

الشكل 5.1: (a) الطواعية المغنطيسية بدلالة درجة الحرارة للمواد المغنطيسية المُسايرة. (b) اتجاه العزوم المغنطيسية في المواد المُسايرة [?].

العناصر الإنتقالية و العناصر التُرابية النادرة و العناصر الأكتنيدية [?] ، حيث تكون الذرات والأيونات الحرة التي تكون فيها الطبقات الإلكترونية الداخلية غير مُكتملة، ومن الأمثلة على ذلك:
$(Mn^{2+}, Gd^{3+}, U6^{4+})$ . حيث كثير من هذه الأيونات تُبدي مغنطة مُسايرة عندما تتحول إلى أجسام صلبة.
الجذور العضوية الحُرة مثل: $C(C_6H_5)_3$ و ذرات الصوديوم الحُرة و أوكسيد الأزوت الغازي، حيث تكون الذرات والجُزيئات التي يكون فيها عدد الإلكترونات فردياً، أي أن السبين الكُلي للجملة لا يُمكن أن يكون معدوماً.
بعض المُركبات ذات العدد الزوجي من الإلكترونات بما فيها جُزيئة الأوكسجين.

حيث عند وضع قطعة من مادة ذات مغنطة مُسايرة على شكل قضيب أمام حقل مغنطيسي فإنهُ يعمل على تجميع وتكثيف خطوط الحقل المغنطيسي، حيث إن القضيب يأخذ اتجاهاً موازياً لخطوط الحقل المغنطيسي. كما في الشكل() [?].



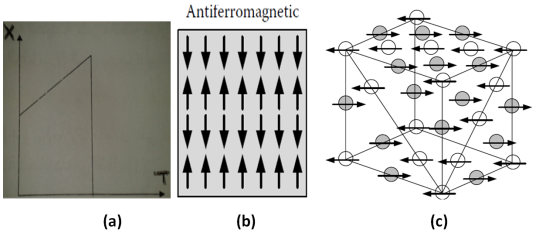

الشكل 6.1: تجميع خطوط الحقل المغنطيسي عند وضع قطعة من مادة ذات مغنطة مُسايرة.

### 3.2.1 المواد المغنطيسية اللاحديدية

تُلاحظ الأوساط حديدية المغنطة ذات السبينات المُتعاكسة في كثير من مُركبات العناصر الإنتقالية، حيث يكون مجموع العزوم المغنطيسية لهذه المواد يساوي الصفر.
يُعتبر (MnO) من أشهر المُركبات التي تنتمي إلى هذا الصنف كما في الشكل () [?].
عند درجة حرارة مُعينة يبدأ الترتيب السابق للسبينات بالإختفاء، كما هو الحال بالنسبة للأوساط الحديدية المغنطة، تُدعى درجة الحرارة هذه بدرجة نيبل $T_N$ . فمن أجل $T > T_N$ فإن المُركب هو وسط مُساير مغنطيسياً [?].

| Substance | $T_N$ (K) | θ (K) |
|---|---|---|
| MnO | 122 | 610 |
| FeO | 198 | 570 |
| NiO | 523 | 3000 |
| FeMn | 423 | |
| NiMn | 720 | |
| $Fe_2O_3$ | 950 | 2000 |

الشكل 7.1: درجة حرارة نيبل ودرجة حرارة كوري للمواد المغنطيسية اللاحديدية [8].




الشكل 8.1: (a) الطواعية المغنطيسية بدلالة درجة الحرارة للمواد المغنطيسية اللاحديدية. (b) اتجاه العزوم المغنطيسية في المواد ذات المغنطة اللاحديدية. (c) توزع سبينات الأيونات في البنية البلورية ل MnO .

## 4.2.1 المواد المغنطيسية اللينة

و تُقسم إلى نوعين:

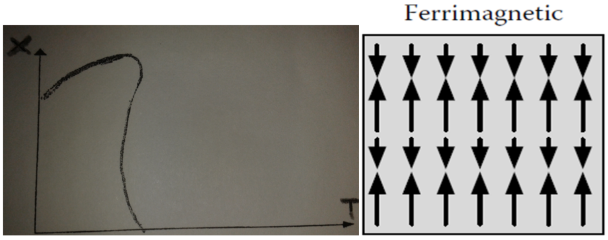
### 1.4.2.1 المواد الفيري مغنطيسية

هي خاصية تتميز بها الأكاسيد المعدنية و تكون صيغتها $MFe_2O_4$ حيث تُرمز M إلى شاردة معدنية ثُنائية التكافؤ و Fe إلى شاردة الحديد ثُلاثية التكافؤ.

إن الأكاسيد المعدنية تتميز بالمقاومة النوعية العالية و تُستعمل في التطبيقات التي تعمل عند تواترات ما بعد 80 ميغا هرتز [5].

تصطف العزوم المغنطيسية في صورة مُضادة للتوازن وبالتالي سوف يكون هُنالك مُحصلة نهائية للعزوم المغنطيسية في أحد الاتجاهات كما في الشكل ().

تكون العلاقة بين الطواعية المغنطيسية و درجة الحرارة كما في الشكل [?] [?].

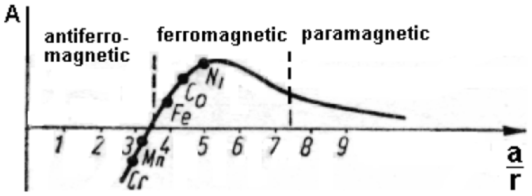



الشكل 9.1: (a) الطواعية المغنطيسية بدلالة درجة الحرارة. (b) اصطفاف العزوم المغنطيسية في صورة مُضادة للتوازن.

من الأمثلة على هذه المواد: $MnFe_2O_4$ و $ZnFe_2O_4$ و $MgFe_2O_4$.

### 2.4.2.1 المواد الفيرومغنطيسية (المغنطة الحديدية)

تمتاز المواد الفيرومغنطيسية بأن لها عزم مغنطيسي تلقائي في درجة حرارة الغرفة، حتى عند غياب الحقل المغنطيسي، حيث إن الخواص المغنطيسية لهذه المواد مُرتبطة إلى حد كبير بالطبقات 3d, 4f الغير مُمتلئة.

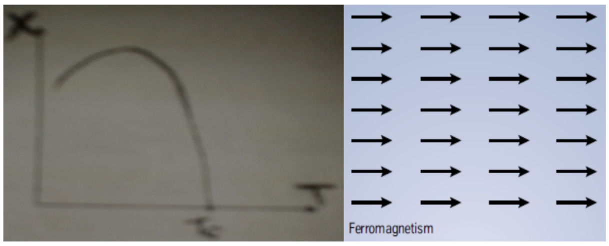



الشكل 10.1: مُنحني (Bethe − Slater) الذي هو تكامل التبادل A بدلالة نسبة المسافة بين الذرات (a) على نصف قطر المدار المملوء بشكل غير كامل (r) (incompletely filled shell) [8]

.

يكون الشعاعان $\vec{M}$ ، $\vec{H}$ لهذه المواد لهما نفس المنحى ونفس الاتجاه، حيث إن هذه المواد تأخذ قيماً عالية للتحريض من أجل حقل مغنطيسي صغير وبنفس جهته. تكون طواعية هذه المواد تابعة للحقل المغناطيسي، كما تكون الطواعية لهذه المواد أكبر بكثير من الصفر ($\chi >> 0$) بحيث يكتسب عملياً هذا النوع من المواد على مغنطة جيدة ونفاذية أكبر بكثير من الواحد ($\mu >> 1$) [?] [11].

عندما $T < T_c$ تكون العزوم المغنطيسية تتجه باتجاه واحد وبالتالي لها عزم مغنطيسي تلقائي والجسم عندها ذات مغنطة حديدية.
وعندما ترتفع درجة حرارته إلى درجة حرارة أعلى أو تساوي درجة حرارة كوري تحول المادة الفيرومغنطيسية إلى مغنطيسية مُسايرة.
يُبين الشكل العلاقة بين درجة الحرارة والطواعية المغنطيسية [?].




(a) (b)

الشكل 11.1: (a) الطواعية المغنطيسية بدلالة درجة الحرارة للمواد الفيرومغنطيسية (المغنطة الحديدية). (b) اتجاه العزوم المغنطيسية في المواد الفيرومغنطيسية [?].

من الأمثلة على هذه المواد: (الحديد، الفولاذ اللين، النيكل، الكوبالت) و خلائط هذه المواد.

| Substance | $B_s$ (T) (290 K) | $B_s$ (T) (0 K) | $\mu_m$ ($\mu_B$) | $\mu_{max}$ ($\mu_0$) | $T_c$ (K) |
|---|---|---|---|---|---|
| Fe | 2.14 | 2.18 | 2.22 | 5000 | 1043 |
| Co | 1.81 | 1.82 | 1.72 | 250 | 1388 |
| Ni | 0.61 | 0.64 | 0.61 | 600 | 627 |
| Gd | | 2.59 | 7.63 | | 292 |
| Dy | | 3.67 | 10.2 | | 88 |

الشكل 12.1: الخواص الرئيسية للمواد الفيرومغنطيسية [8].

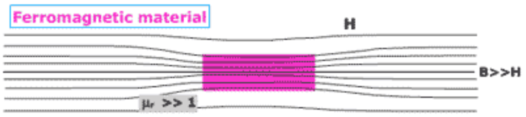
حيث إن الخلائط الغنية بالحديد هي مُفضلة في التطبيقات التي تتطلب كثافة إشباع عالية حيث تكون مُقاومتهم النوعية مُنخفضة، وهذا عائق مُهم والذي يؤدي لضياعات عالية بتيارات فوكو في تطبيقات التيار المتناوب [5].
من الناحية الأُخرى إن الخلائط التي تعتمد على النيكل تكون النفاذية الإبتدائية (الأولية) و العُظمى كبيرة وتُستخدم في التطبيقات التي تعمل عند تردُدات تحت 2 كيلو هرتز على شكل جسد (حجم) (bulk form) وتحت 50 كيلو هرتز على شكل مسحوق أو صفيحة رقيقة (laminated or powdered) [5].
إن أكثر أنواع خلائط حديد – نيكل لها استعمالات صناعية واسعة هي:

1. الخليطة Fe36%Ni لها مُقاومة نوعية عالية،
2. الخليطة Fe50%Ni لها مغنطة إشباع عالية،
3. الخليطة Fe80%Ni لها نفاذية عالية جداً [5].

حيث عند وضع قطعة من مادة فيرومغنطيسية على شكل قضيب أمام حقل مغنطيسي فإنهُ يعمل على تجميع وتكثيف خطوط الحقل المغنطيسي، حيث إن القضيب يأخذ اتجاهاً موازياً لخطوط الحقل المغنطيسي، كما في الشكل(). [?].

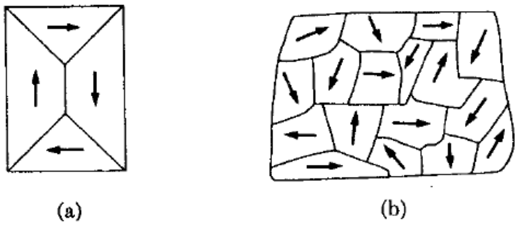
### 5.2.1 المناطق الفيرومغنطيسية

قام ويس عام 1907 بفرض أن المواد الفيرومغنطيسية تتكون من مناطق فيرومغنطيسية تتراوح أبعادها بين 0.001mm و 0.1mm ، حيث تكون كُل منطقة مُمغنطة بالكامل (يكون لها عزم مغنطيسي غير معدوم)، ولكن يُمكن للمناطق



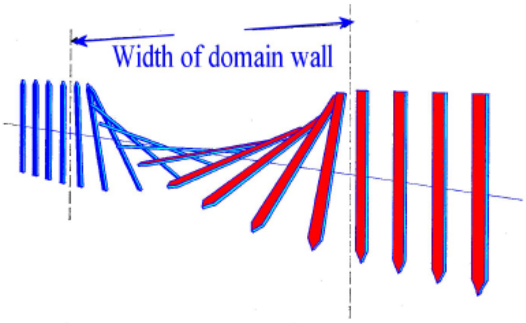

الشكل 13.1: تجميع وتكثيف خطوط الحقل عند وضع قطعة من مادة فيرومغنطيسية على شكل قضيب أمام حقل مغنطيسي

المغنطيسية المُختلفة أن تكون باتجاهات عشوائية مُتباينة كما في الشكل( )، وبهذا تظهر على هيئة غير ممُغنطة (تُصبح العزوم المغنطيسية معدومة) من وجهة النظر العينية [?].




الشكل 14.1: تراكيب المناطق الفيرومغنطيسية: (a) بلورة أُحادية. (b) نموذج مُتعدد البلورات. تُمثل الأسهم إتجاه المغنطة.

يُطلق على المنطقة الواقعة بين المنطقتين المغنطيسيتين اسم جدار المنطقة المغنطيسية (جدار بلوخ). حيث عند العبور من منطقة مغنطيسية إلى أُخرى مُجاورة لها، فإن مُتجه العزم الذري $m_0$ يدور تدريجياً من اتجاهه الأصلي إلى الاتجاه الجديد على مدى حوالي 100 ذرة كما في الشكل( ) [?].



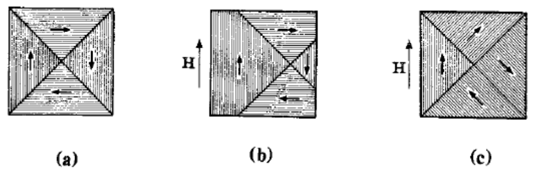

الشكل 15.1: جدار بلوخ بين منطقتين مغنطيسيتين لمادة فيرومغنطيسية.

يُظهر أن عزم البرم الذري في منطقة الجدار يقع تحت تأثير مجال جُزيئي أقل بقليل مما يتعرض له عزم البرم الذري داخل المنطقة المغنطيسية. إن هذه المُلاحظة تُلائم هيئة المنطقة المغنطيسية المُنفردة [?].

ومن جهة أُخرى، فإن عينة متكونة من منطقة مغنطيسية واحدة تتطلب بقاء حقل مغنطيسي خارجي كبير، على حين تمتلك العينة المتكونة من مناطق مغنطيسية مُتعددة طاقة مغنطيسية مُصاحبة لتركيب مجالها أقل مما عليه في حالة المنطقة المُنفردة. وبهذا فإن التركيب المتكون من مناطق مغنطيسية مُتعددة يكون هو المُفضل من وجهة نظر الطاقة [?].

إن مظاهر التمغنط العينية في المواد الفيرومغنطيسية تكون مُتعلقة بتغيرات هيئة المنطقة المغنطيسية. والزيادة في التمغنط ناتجة عن تأثير الحقل المغنطيسي المؤثر، حيث يحدث بعمليتين مُستقلتين: إما بزيادة حجم المناطق المغنطيسية التي يكون اتجاهها مُتفقاً مع اتجاه الحقل الخارجي على حساب المناطق المغنطيسية التي لا تكون باتجاه الحقل (حركة جدار بلوخ)، أو بدوران اتجاه تمغنط المنطقة المغنطيسية نحو اتجاه الحقل. العمليتان موضحتان بالشكل() [?].

حيث يعتمد حجم المناطق المغنطيسية بشكل كبير على نوع المواد، وعلى ماضي العينة المغنطيسية ..... وهكذا. إن القيم النموذجية لحجوم المناطق تنحصر بين $10^{-6}\mathrm{cm}^3$ و $10^{-2}$ [?].




الشكل 16.1: تمغنط مادة فيرومغنطيسية: (a) غير مُتمغنطة. (b) مُتمغنطة بحركة جدار المنطقة المغنطيسية (جدران بلوخ). (c) مُتمغنطة بدوران المنطقة المغنطيسية.

عند تسليط حقول ضعيفة يتغير التمغنط اعتيادياً عن طريق حركة جدران بلوخ. في المواد النقية تكون حركة الجدار وإلى مدى واسع قابلة للعكس عند منطقة الحقل الضعيف [?].

أما في حالة الحقول الشديدة ينمو التمغنط بفضل حركة الجدار الغير قابلة للعكس، و بفضل دوران المناطق المغنطيسية. في هذه الظروف تبقى المادة مُتمغنطة عند زوال الحقل المغنطيسي الخارجي [?].

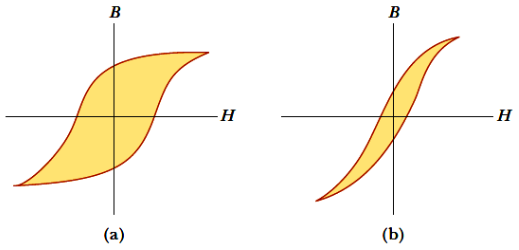
# 3.1 أنواع المواد الفيرومغنطيسية

## 1.3.1 المواد الفيرومغنطيسية اللينة

و هي المواد المُعدة لإحتواء التدفق المغنطيسي حيث نسعى للحصول على حلقة أضيق ما يُمكن كما في الشكل()، حيث تتناسب مساحة الحلقة مع العمل الذي يجب القيام به حتى نحصل على حلقة بطاء كاملة، وبما أن هذا العمل موجب فإنهُ يُصرف على شكل حرارة داخل المادة و يُمكن أن ينتج عنهُ تسخين مُضر بها [?].

تتصف المواد المغنطيسية اللينة بأنها سهلة التمغنط وسهلة إزالة المغنطة ولها حلقات بطاء صغيرة نسبياً [?].

من المواد اللينة مغنطيسياً الحديد النقي غير أن الحصول على الحديد النقي ليس بالأمر السهل أو القليل الكلفة مما يجعل استعماله مُتعذراً، ويستعمل بدلاً منه بعض أنواع الفولاذ اللين التي تُسمى بأنواع الحديد اللين. والحديد النقي رُغم أنهُ من أجود مايُمكن استعماله في الأغراض التي تحتاج إلى ليونة مغناطيسية فإن مُقاومته الكهربائية صغيرة، وبإستعماله في الآلات الكهرُبائية أو المحولات يجعل الضياعات أكبر بسبب تيارات فوكو، ولإنقاص مقدار هذا الضياع هُناك عدة طرق أهمها: إنقاص مقطع الصفائح المُستعملة (بصنع صفائح رقيقة) من جهة و إضافة بعض العناصر الخلائطية من جهة أُخرى [?].

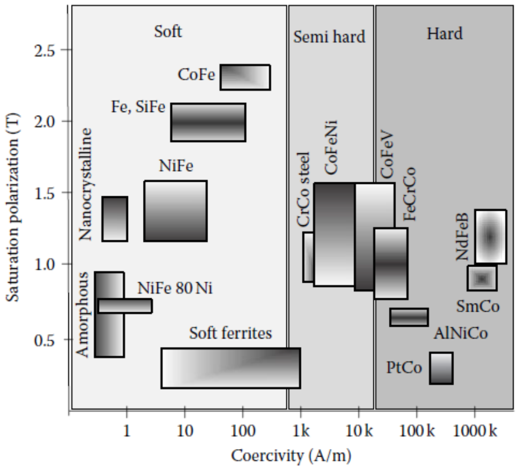



الشكل 17.1: (a) حلقة البطاء لمادة مغنطيسية قاسية، (b) حلقة البطاء لمادة مغنطيسية لينة.

## 2.3.1 المواد الفيرومغنطيسية القاسية

هذه المواد تتصف بحقل قاهر كبير و حلقة بطاء كبيرة، لذلك تُستخدم في حالة المغانط الدائمة.

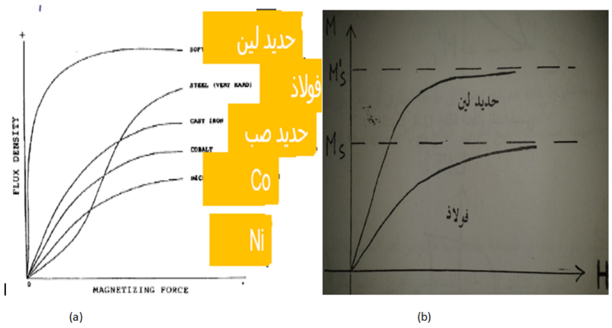
يرتبط الحقل القاهر بثبات جدران بلوخ (جدران المجالات) الذي تُسببهُ العيوب (شوائب – رواسب – تشوهات – عيوب بلورية أُخرى)، وتجدر الإشارة إلى أن تلك العيوب تجعل المادة ذات مغنطيسية قاسية و تُقسيها ميكانيكياً أيضاً **[?]**.




الشكل 18.1: الحقل القاهر بدلالة استقطابية الإشباع للمواد المغنطيسية (اللينة ونصف القاسية والقاسية) [8].

## 4.1 مُنحني المغنطة الإبتدائي

نُسمي المُنحني الذي يعطي شدة المغنطة M أو التحريض المغنطيسي (كثافة التدفق المغنطيسي) B بدلالة الحقل المُحرض H لعينة لم تخضع قبلاً لحقل مغنطيسي بمُنحني المغنطة الأبتدائي، كما في الشكل ().
نُلاحظ أن شدة المغنطة تصل إلى قيمة ثابتة اعتباراً من قيمة محدودة للحقل وهي ظاهرة الإشباع.
تجدر الإشارة إلى أننا نصل إلى الإشباع في الحديد اللين من أجل قيم أقل للحقل المُحرض وتكون شدة المغنطة عند الإشباع في الحديد أكبر منها في الفولاذ والحديد الصب والكوبالت والنيكل كما في الشكل () [11].

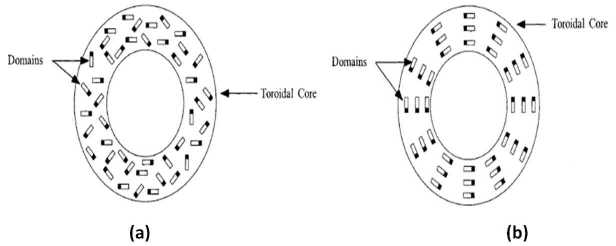



الشكل 19.1: مُنحني المغنطة الإبتدائي لبعض المواد: (a) المغنطة بدلالة الحقل المغنطيسي. (b) كثافة التدفق المغنطيسي بدلالة الحقل المغنطيسي [11].

## 5.1 حلقة البطاء

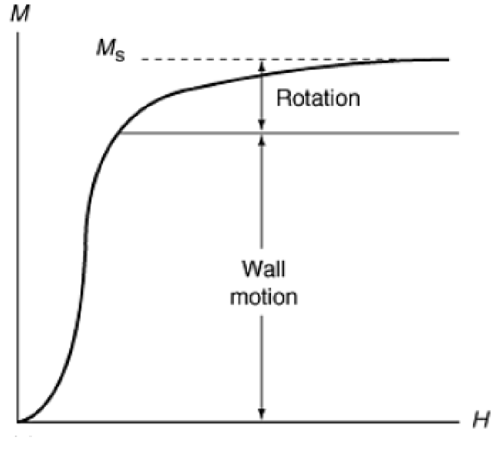
نلاحظ من الشكل () عند حقل مغنطيسي معدوم يكون التحريض المغنطيسي معدوم، وبالتالي تكون المجالات المغنطيسية (مناطق ويس) (Domains) تتوزع بشكل عشوائي، ومع زيادة الحقل المغنطيسي بشكل تدريجي تنمو مناطق ويس التي

لعزومها المغنطيسية نفس اتجاه الحقل المغنطيسي المطبق على حساب المناطق المغنطيسية الأخرى، مع إزاحة لجدران بلوخ داخل المادة، عند تطبيق حقل مغنطيسي خارجي تصبح كل المناطق موجَّهة باتجاه الحقل المطبق فتُشبَع المادة مغنطيسياً كما في الشكل ( و) من أجل حقل إشباع $H_s$، ومغنطة إشباع $M_s$. وعندما يُزال الحقل الخارجي فإن تلك المناطق لن تعود تدريجياً إلى ترتيبها الأصلي، لأن جدران المناطق قد تصطدم بعوائق مثل حدود الحبيبات أو الانخلاعات وغيرها. لذا لن تكون المغنطة معدومة عند $H = 0$، وتدعى تلك المغنطة المغنطة الباقية $M_r$ (يقابلها تحريض باقي $(B_r)$ حيث تكون العزوم المغنطيسية موجهة باتجاه واحد [3].




الشكل 20.1: (a) المجالات المغنطيسية مُرتبة بشكل عشوائي. (b) المجالات المغنطيسية أُصطفت باتجاه مُحدد [?].

وللتغلب على تلك العوائق تحتاج المادة لطاقة تُمكِّنُها من القفز فوق تلك العوائق، وهذا يتطلَّب تطبيق حقل مغنطيسي معاكس للمغنطة، تتعلَّق شدَّته بالعوائق و بالمادة المدروسة، حتى تصبح المغنطة معدومة عند حقل شدَّته $-H_C$ حيث تكون العزوم المغنطيسية تتجه باتجاهات عشوائية [3].




الشكل 21.1: حركة جدران بلوخ و دورانها.

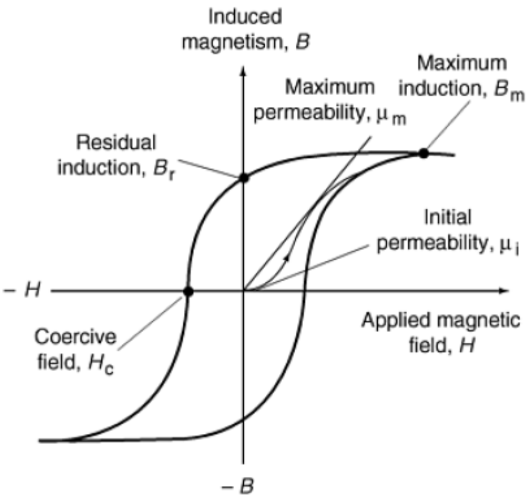
بزيادة شدة الحقل في الإتجاه المُعاكس نصل إلى القيمة $-H_s$ و تكون قيمة مغنطة الإشباع عندها $-M_s$.

يُسمى المُنحني المُغلق الذي نحصل عليه من أجل حقل يتغير بين $-H_s$ و $+H_s$ بحلقة البطاء المغناطيسي [11].

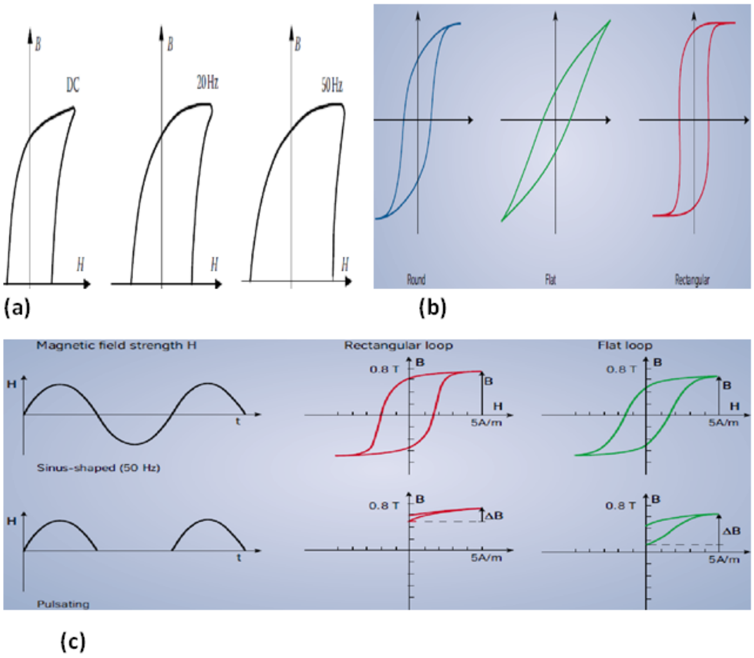
يجب أن نمَيِّز بين الحقل اللازم لإرجاع M إلى الصفر ،والحقل اللازم لإرجاع التحريض B إلى الصفر هذا التمييز مهم فقط في المغانط الدائمة (المواد القاسية)، لأن $M >> H_c$ عادةً في المواد اللينة، ومن ثَمَّ يكون الحقل اللازم للحصول على $M = 0$ يساوي تقريباً الحقل الموافق ل $B = 0$ [7].

يوجد لدينا أشكال لحلقات البطاء: إما مُستطيلة (rectangular) أو مُسطحة (Flat) أو دائرية (round) كنا في الشكل () [?].

إن أشكال حلقات البطاء توصف عن طريق نسبة $\frac{B_R}{B_S}$ أو عن طريق نسبة $\frac{B_R}{B_M}$ كما هو موضح بالجدول [?].




الشكل 22.1: حلقة البطاء



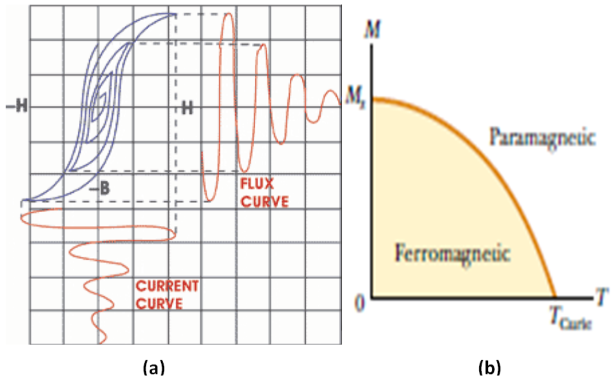

الشكل 23.1: (a) حلقة البطاء عند تيار مُستمر و تيار جيبي (تواترات مُختلفة). (b) أشكال حلقات البطاء: المُستطيلة و المُسطحة و الدائرية. (c) تغير التدفق المغنطيسي لتيار جيبي وتيار مُستمر نبضي للحلقات المُستطيلة و المُسطحة. [?]

| Hysteresis loop shape | $B_R/B_M$ |
|---|---|
| Round | approximately 0.6 – 0.7 |
| Flat | < 0.5 |
| Square | approximately 0.9 |

الشكل 24.1: إن أشكال حلقات البطاء توصف عن طريق نسبة $\frac{B_R}{B_M}$. [?].

## 6.1 كيفية إزالة مغنطة مادة فيرومغنطيسية

من المّمكن إزالة مغنطة مادة فيرومغنطيسية إما بعكس تيار المغنطة عدة مرات مع إنقاص قيمة التيار في كُل مرة عن سابقتها وهكذا فإن العينة تمر بمُنحني بطاء يلتف مّتقارباً بالتدريج من نقطة الإبتداء كما في الشكل() [?] ،أو عندما نرفع درجة حرارة المادة الفيرومغنطيسية إلى درجة أعلى أو تساوي درجة كوري حيث تُصبح المادة ذات مغنطة مُسايرة كما في الشكل ()، حيث تفقد المادة خاصيتها بسبب التهيج الحراري الناتج فتُصبح محصلة العزوم المغنطيسية للإلكترونات معدومة، مثال على ذلك: الفولاذ قليل المحتوى الكربوني درجة حرارة كوري لهُ تقريباً $700°C$ عند تسخينه فوق هذه الدرجة يتحول إلى فولاذ أوستينيتي ويفقد خواصه المغنطيسية. عند تبريده يقوم بتحول عكوس ولن يحتوي على مغنطة مُتبقية. [?].




الشكل 25.1: (a) مُنحني إزالة المغنطة بعكس تيار المغنطة عدة مرات مع إنقاص قيمة التيارفي كُل مرة عن سابقتها. (b) تحول المادة الفيرومغنطيسية إلى مادة ذات مغنطة مُسايرة عند رفع درجة الحرارة إلى فوق درجة كوري.

## 7.1 أليات إنقلاب المغنطة

كان Stoner- Wohlfarth (1948) أول من طرح فكرة دراسة آليات إنقلاب المغنطة. فقد درس إنقلاب المغنطة في مجسم بيضوي ( قطع ناقص دوراني)، أثناء تطبيق حقل خارجي H بزاوية $(\theta_0)$ مع محور القطع (محور التمغنط السهل الوحيد). واقترحا نموذجاً مثالياً لإنقلاب المغنطة، يُعرف بنموذج وولفارث – ستونر.

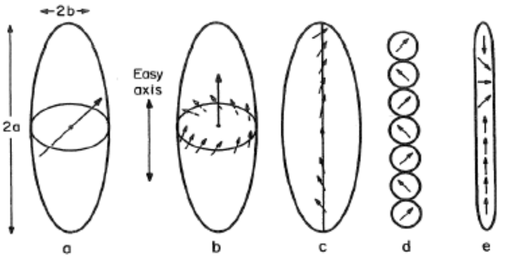
يفترض هذا النموذج أن المجسم وحيد المجال المغنطيسي، وأن جميع العزوم المغنطيسية في المجسم تدور معاً أثناء تطبيق الحقل، لذا تُدعى هذه الآلية بآلية الدوران المُتماسك. وقد استنتج هذا النموذج حلقات البطاء $M - H$ الناتجة حسب الزاوية $\theta_0$ [2].

في الواقع، لن تُغير الجُسيمات وحيدة المجال مغنطتها دوماً حسب آلية المتماسك (الشكل ) ، لذا ثمة نماذج أخرى مُحتملة لإنقلاب المغنطة، وتتضمن الإلتفاف والإلتواء ( أو الثني ) ( الشكل ) . تسمح هذه النماذج بدوران أسهل للمغنطة ومن ثم تكون حقول إنقلاب المغنطة وفقها أصغر من الحقل اللازم في نموذج Stoner-Wohlfarth. والملاحظ تجريبياً أن نموذج الإلتفاف هو الأكثر أهمية [2].

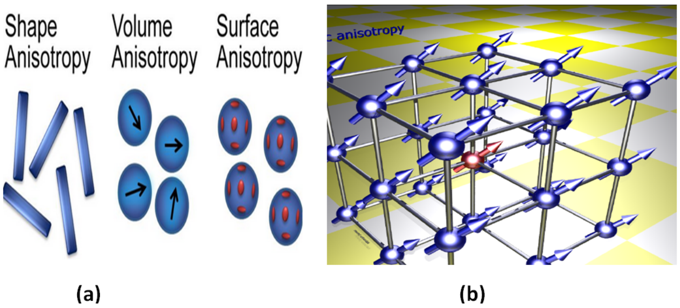
وبوجه خاص ، وجد Knowles، [2]، في حالة الجسيمات ذات الشكل الإبري، أن نموذج إنقلاب المغنطة، يُشبه لحد ما قلب الدومينو بعضها بعضاً، من إحدى نهايات الجسيم إلى النهاية الأخرى على طول المحور الطويل للجسيم ( الشكل).

### 1.7.1 الإنزتروبية المغنطيسية

الإنزتوبية المغنطيسية تعتمد على اتجاه الخواص المغنطيسية للمادة، حيث أن العزم المغنطيسي للمواد الإنزتروبية المغنطيسية سيميل إلى الإصطفاف وفق المحور السهل [?].

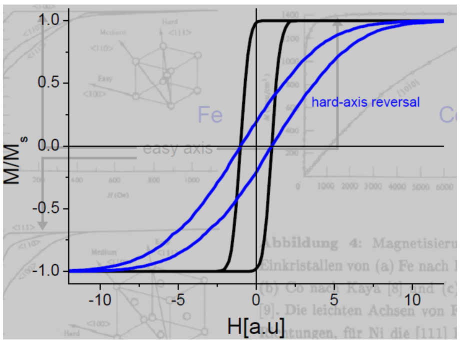



الشكل 26.1: الشكل : نماذج إنقلاب في الجسيمات ذات الشكل البيضوي . (a) دوران متماسك. (b) التفاف. (c) ثني. (d) انتشار (سلسلة كرات). (e) تأثير الدومينو [2].




الشكل 27.1: (a) أنواع الإنزتروبية المغنطيسية في الجُزيئات. (b) الإنزتروبية المغنطيسية.

إن عكس المحور الصعب (hard-axis reversal) مُميز بأنهُ يحتاج لحقل عالي للوصول لإشباع العينة، أما عكس المحور السهل (easy-axis reversal) مُميز بالضياعات العالية لحلقة البطاء كما في الشكل() [?].

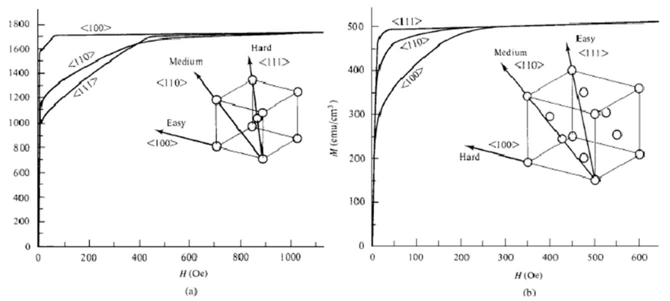



الشكل 28.1: يُبين الشكل عكس المحور الصعب و عكس المحور السهل [?].

إن الإنزتروبية المغنطيسية شرط لحلقة البطاء للمواد الفيرومغنطيسية، حيث بدون الإنزتروبية المغنطيسية، الفيرومغنطيسية تُصبح مادة ذات مغنطة مُسايرة مُمتازة (سوبر بارامغنطيسية).

في الفيزياء، المادة الفيرومغنطيسية يُقال عنها أنها تمتلك توجه خطي للبلورات (magnetocrystaline anisotropy) إذا أخذت طاقة (طاقة إنزتروبية) أكبر لتمغنطه في أحد الاتجاهات أكثر من الاتجاهات الأُخرى، هذه الاتجاهات تتعلق عادةً بالمحاور الأساسية لشبكة البلورية كما في الشكل ()، وهو حالة خاصة من الإنزتروبية المغنطيسية. حيث هذا التوجه الخطي للبلورات يملك تأثير كبير على الإستعمالات الصناعية للمواد الفيرومغنطيسية [?].

إن المواد ذات الإنزتروبية المغنطيسية العالية يكون لها حقل قاهر ($H_C$) كبير، حيث تكون هذه المواد صعبة إزالة المغنطة فتُسمى المواد الفيرومغنطيسية القاسية.



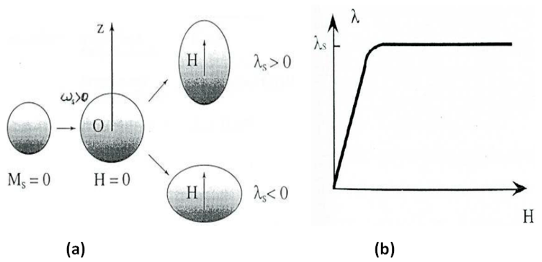

الشكل 29.1: مُنحنيات المغنطة للبلورات الوحيدة (a) للحديد (b) للنيكل .
[2]

من جهة أُخرى إن المواد ذات الإنزتروبية المغنطيسية المُنخفضة يكون لها حقل قاهر $(\mathrm{H_C})$ صغير، حيث تكون هذه المواد سهلة إزالة المغنطة فتُسمى المواد الفيرومغنطيسية اللينة.

### 2.7.1 التخصر المغنطيسي

إن التخصر المغنطيسي ملكية خاصة للمواد الفيرومغنطيسية التي تجعلهم تُغير شكلهم أو أبعادهم أثناء عملية المغنطة [?].

إختلاف المغنطة للمواد بسبب تطبيق حقل مغنطيسي يُغير إنفعال التخصر المغنطيسي حتى وصوله إلى قيمة الإشباع $(\lambda)$ كما في الشكل() [?]. هذا التأثير لوحظ عن طريق جول عندما راقب الحديد.




الشكل 30.1: 1.

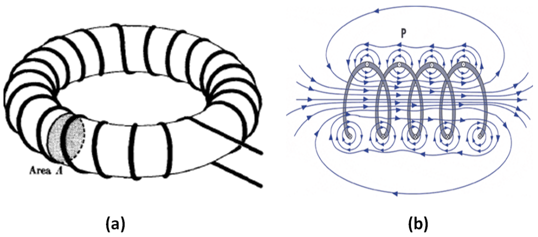
يُسبب هذا التأثير ضياعات بسبب التسخين بالإحتكاك في النواة الفيرومغنطيسية. إن هذا التأثير هو المسؤول عن صوت الرنين المُنخفض الذي يُسمع قُرب المحولات أثناء مرور التيار المتناوب

## 8.1 الحث الذاتي

هو توليد قوة مُحركة في ملف بسبب تغير شدة التيار في نفس الملف، حيث تغيير شدة التيار يؤدي إلى تغيير التحريض المغنطيسي و تغيير التدفق المغنطيسي وبالتالي تتولد قوة دافعة كهربائية مُتحرضة [?].

الحقل المغنطيسي حول أطراف الملف يُشكل حلقات دائرية حول بداية اللفة لكن باتجاه معاكس للفة التالية مما يؤدي إلى إلغاء الحقول المغنطيسية لبعضها البعض ولذلك الحقل المغنطيسي يتركز داخل الملف. فتتشكل خطوط مستقيمة داخل الملف حيث إن هذا الخط هو جزء في مسار مُغلق (بدايته ونهايته واحدة) كما في الشكل(). إن التحريض المغنطيسي داخل لفات الملف يُساوي [?]:

$$B = \frac{\mu_0 . N . I}{L}$$




الشكل 31.1: (a) ملف حلزوني حلقي. (b) خطوط الحقل المغنطيسي.

أما التدفق المغنطيسي الذي يتخلخل كُل لفة من لفات الملف فيُساوي:

$$\phi = \frac{\mu_0.N.I.A}{L}$$

عندئذ يُصبح التدفق الكُلي خلال جميع لفات الملف وعددها N مُساوياً:

$$\phi = \frac{\mu_0.N^2.I.A}{L}$$

وببساطة نجد أن الحثية تُصبح :

$$L = \frac{d\phi}{dI} = \frac{\mu_0.N^2.A}{L}$$

## 9.1 الحث المُتبادل بين الملفين

إذا وضع ملفان بالقرب من بعضهما البعض أو إحداهُما داخل الأخر ولكنهما معزولان عن بعضهما البعض فإن تغيُر شدة التيار في الملف الأول، يؤدي لتغير التدفق المغنطيسي لهذا الملف، وبالتالي يتولد قوة دافعة كهربائية مُتحرضة في الملف الأخر وتتناسب هذه القوة مع مُعدل التغير في شدة التدفق المغنطيسي في الملف الأول و تُعطى من العلاقة:

$$\xi = -\frac{d\phi}{dI}$$

تدل الإشارة السالبة على أن اتجاه القوة الدافعة المغنطيسية وكذلك اتجاه التيار المُتحرض يُعاكس التغير المُسبب له (حسب لورنز).

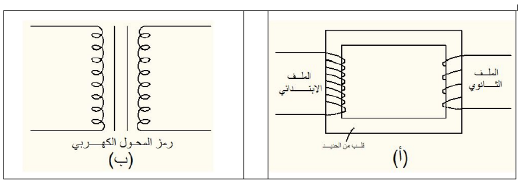
ويتوقف مُعامل التحريض المُتبادل بين ملفين على مايلي:

أولاً: وجود نواة حديد داخل الملف أو عدم وجوده.

ثانياً: عدد لفات الملف.

ثالثاً: المسافة الفاصلة بينهم.

أهم تطبيق للتحريض المُتبادل هو المحول الكهرُبائي وفي الشكل () رسم توضيحي للمحول [?].



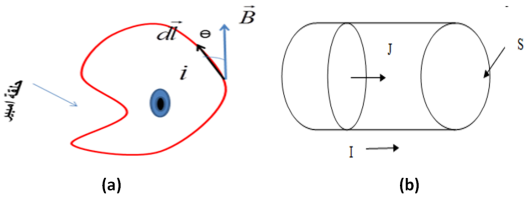

الشكل 32.1: (أ) تركيب المحول. (ب) رمز المحول.

## 10.1 قانون أمبير

ينص على أن: التكامل الخطي لتحريض المغنطيسي حول مُنحني مُغلق يساوي حاصل ضرب في التيارات خلال السطح الذي يحيط به المسار المغلق. و بما أن تكامل التحريض المغنطيسي حول مسار مغلق هو القوة الدافعة المغنطيسية فعلى ذلك يُمكن كتابة قانون أمبير على الصورة التالية: القوة الدافعة المغنطيسية حول أي مسار كامل مُغلق تتناسب مع التيارات الكهرُبائية المُصاحبة للمسار المُغلق وثابت التناسب هو $\mu_0$ ورياضياً يُمكن كتابتها على الصورة التالية:

$$\oint \overrightarrow{B}.\overrightarrow{dl} = \mu_0.\Sigma I$$

وتُسمى هذه الصيغة بالصيغة التكامُلية لقانون أمبير. ولإيجاد الصيغة التفاضُلية لقانون أمبير نفرُض أن المسار




الشكل 33.1: (a) حلقة أمبير. (b) مسار مغلق يُحيط بسلك أسطواني.

المغلق يُحيط بسلك أسطواني الشكل يمر به تيار شدته I ومساحة مقطعه S، كما بالشكل().
فإذا اعتبرنا أن J هي كثافة التيار المار في السلك المغلق فيكون التيار المار خلال العنصر الصغير من المساحة ds هو : dI

$$dI = \overrightarrow{j}.\overrightarrow{ds}$$

$$I = \int \overrightarrow{j}.\overrightarrow{ds}$$

$$\oint \overrightarrow{B}.\overrightarrow{dl} = \mu_0 \int \overrightarrow{j}.\overrightarrow{ds}$$

وباستخدام نظرية ستوك:

$$\oint \overrightarrow{B}.\overrightarrow{dl} = \mu_0 \int \overrightarrow{j}.\overrightarrow{ds} = \int (\overrightarrow{\nabla} \bigwedge \overrightarrow{B}).\overrightarrow{ds}$$

وباعتبار صحة التكامل لأي مساحة (S) نجد أن:

$$\mu_0.\overrightarrow{j} = \overrightarrow{\nabla} \bigwedge \overrightarrow{B}$$

و تُسمى هذه الصيغة بالصيغة التفاضُلية لقانون أمبير، و تربط الصيغة التفاضلية بين مُعدل تغير التحريض المغنطيسي عند نقطة ما وبين كثافة التيار عند تلك النقطة.

## 11.1 قياس الخواص المغنطيسية

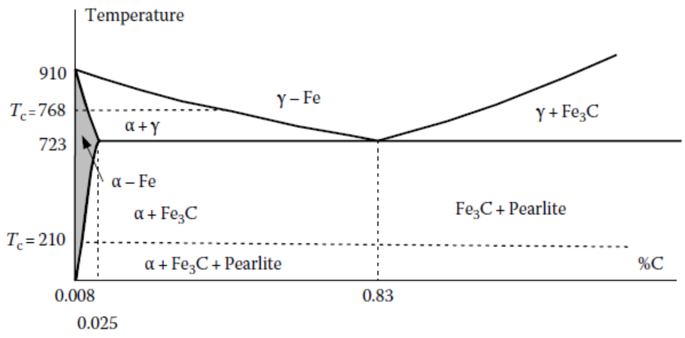
أُبتكرت العديد من الطرق لقياس الخواص المغنطيسية للمادة وطوِّرت العديد من الأجهزة لخدمة هذا الغرض. تُصنَّف أجهزة قياس الخواص المغنطيسية إلى أجهزة قياس خواص المواد المغنطيسية القاسية وأجهزة قياس خواص المواد المغنطيسية

اللينة وذلك وفقاً للتطبيق الرئيسي المستخدمة فيه هذه الأجهزة (حتى لو كان بإمكان الجهاز قياس خواص المواد المغنطيسية القاسية واللينة معاً) [8].

يمكن اختيار الجهاز المناسب لقياس الخواص المغنطيسية لمادة معينة بعد تحديد نوع المادة المغنطيسية (قاسية أم لينة) وبعد تحديد الخواص المغنطيسية المطلوب قياسها. تختلف الخواص المغنطيسية الممكن قياسها هو الجهاز The Vibrating-Sample Magnetometer VSM من جهاز لأخر فمثلاً بينما يكون جهاز Torque Magne-tometer القادر على قياس درجة حرارة كوري ورسم حلقة البطاء معاً يكون جهاز قياس العزم هو الجهاز القادر على تحديد ثابت اتجاهية المادة المغنطيسية، وهكذا... [8].

## 12.1 مُخطط الأطوار للحديد

.[?]




الشكل 34.1: مُخطط حديد – كربون
[8]

## 13.1 مُخطط الأطوار للحديد– نيكل

يمتلك النيكل بلورة مُتمركزة الوجوه مثل: الأوستنيت (لدينا طور واحد). لذلك فهما يُشكلان محاليل صلبة لا محدودة الإنحلال. يرفع النيكل $A_4$ ويُخفض $A_3$. يتم تعيين درجة التحول خلال التسخين والتبريد لإختلافُهما الكبير [?].

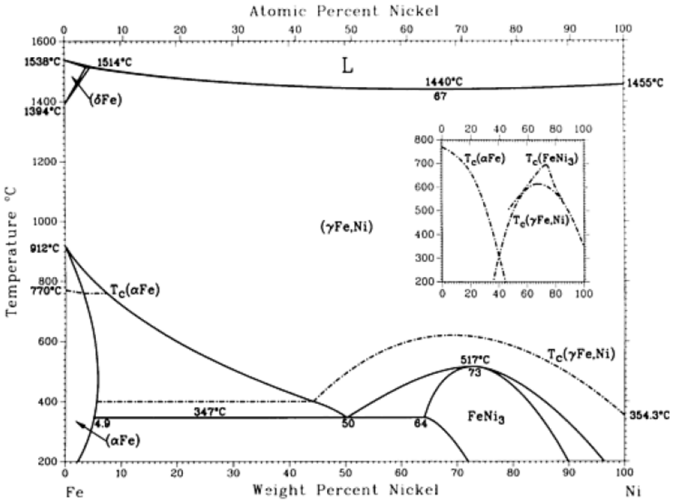
عند الدرجة 500°C يُصبح الإنتشار النيكل صعباً. لذلك فإن التحول (إلفا) ($\alpha$) إلى غما ($\gamma$) ) أو عكسه يجري دون انتشار وفق الألية المارتينسيتية [?].

## 14.1 درجة حرارة كوري

عندما نرفع درجة حرارة لمادة حديدية ممُغنطة إلى درجة درجة أعلى أو تساوي من نقطة كوري، حيث تفقد المادة خاصيتها بسبب التهيج الحراري الناتج فتصبح محصلة العزوم المغناطيسية للإلكترونات معدومة حيث تكون المادة فيرومغنطيسية تُصبح المادة ذات مغنطة مُسايرة.

## 15.1 الفرق بين التحولات الطورية والمغنطيسية

تتميز التحولات المغنطيسية بالمقارنة مع التحولات الطورية بالخصائص التالية [?]:




الشكل 35.1: .مُخطط حديد – نيكل

أولاً: تنخفض الخواص المغنطيسية بالتدريج مع الإقتراب من نقطة كوري من دون أن تترافق مع تغير مُفاجئ للخواص الميكانيكية.

ثانياً: لا يملك التحول المغنطيسي تخلفاً حرارياً، فازدياد سرعة التبريد لا تُخفض درجة حرارة التحول.

ثالثاً: تتغير عدد من الخواص الكهربائية والمغنطيسية عند التحول المغنطيسي بينما تبقى الخواص الميكانيكية ثابتة.

رابعاً: لايترافق التحول المغنطيسي مع إعادة تبلور في الشبكة البلورية (أي تشكل حُبيبات جديدية) أو تغير هذه الشبكة.

## 16.1 خلائط الحديد وخصائصها المغنطيسية

إن الخواص المغنطيسية تتصف بأنها يُمكن التحكم بها عن طريق مغنطة الإشباع و طاقات الإنزوتروبية المغنطيسية [?].

الأنواع المُختلفة لطاقة الإنزوتروبية المغنطيسية، والبلورات المغنطيسية، والإنزوتروبي التخصر المغنطيسي، هُم الأكثر أهمية في نظام حديد – نيكل. بالإضافة إلى حركة جدران بلوخ و تفاصيل البنية الميكروية مثل مُحتوى المُتضمن وحجم الحبيبات [?] [?].

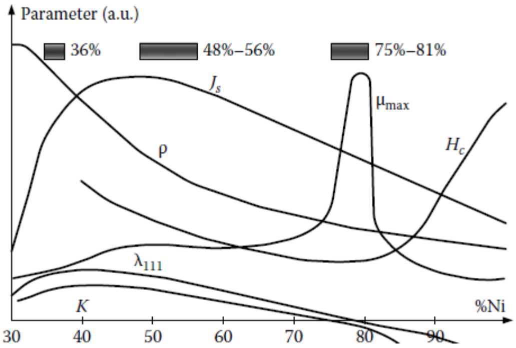
إن الخلائط المعدنية ذات النفاذية العالية تعتمد على نظام حديد – نيكل.

لقد قام Hopkinson بالتحري عن خلائط حديد – نيكل بحدود عام (1899) ، بعد فترة زمنية حوالي (1913) بدأ Elmen بدراسة الخواص المغنطيسية لهذه الخلائط عند الحقول المغنطيسية الضغيفة وقام بدراسة تأثير المُعالجات الحرارية على هذه الخواص، حيث أُدركت أهمية خلائط حديد – نيكل. حيث سمى Elmen خلائط حديد – نيكل بالبرمالويات (permalloys) ، و براءة إختراعه الأولى كانت عام (1916). إن التركيب الأفضل كان للخليطة Fe78%Ni [?].

بعد فترة قليلة من Elmen ، بدأ yensen يتحرى بشكل مُستقل عن الخليطة Fe50%Ni (hipernik) والتي تمتلك نفاذية مُنخفضة ومُقاومة نوعية مُنخفضة، لكن الإشباع عالي لها أكبر من 78 permalloy، ((1.5T) بالمُقارنة مع (0.75T)) ، والذي جعلها مُفيدة كثيراً في معدات (تجهيزات) الطاقة.

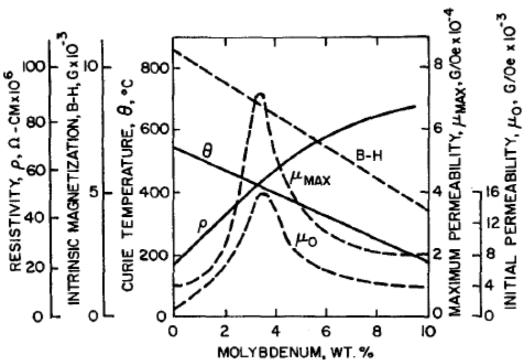
في أوائل الأربعينات أُكتشفت مادة جديدة 16%Fe - 82%Ni - 2%Mo وهي مسحوق برمالوي الموليبدنيوم (Molybdenum Permalloy Powder) (MPP) [?].

إن المادة الجديدة طورت من أجل أنوية الترشيح (filter cores) والمحولات ذات الترددات الناقلة (carrier frequencies) في الهاتف، حيث تم تطوير هذه الأنوية من قبل مخبر هاتف بيل (bell) والشركة الكهربائية الغربية.




الشكل 36.1: محتوى النيكل بدلالة البرامترات المُختلفة لخليطة حديد – نيكل [8].

حيث أن هذه الأنوية أُستُعملت في العديد من الدارات الصناعية والعسكرية. إن التحسينات في خلائط الحديد – نيكل




الشكل 37.1: تغير في البرامترات المغنطيسية عند إضافة الموليبدينيوم بنسب مُختلفة لخليطة 78.5%Ni – Fe .(Bozorth 1951)

[?]

أُنجزت عند درجات حرارة تلدين عالية في جو الهيدروجين، والتي أول من كتب تقريراً عنها هو Yensen.

التحسين التالي كان بتوجه حُبيبات المادة و تلدينها بوجود حقل مغنطيسي والذي كان أيضاً في جو الهيدروجين. هذا العمل أُنجز من قبل Bozorth و Kelsall، و سُمي " بالتلدين المغنطيسي "، والذي لا يقوم فقط بزيادة النفاذية بل يعطي حلقة بطاء مُربعة، وهذا مُهم في أجهزة مُحول الطاقة ذات التواترات العالية، هذا العمل أُنجز من قبل Bozorth و Kelsall [?].

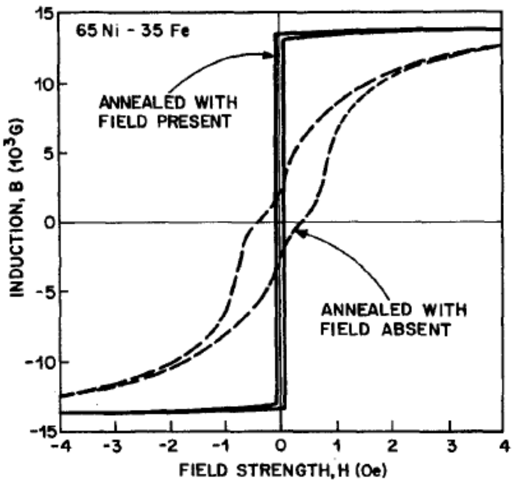
إن خلائط حديد – نيكل يُمكن أن تكون حلقتها إما مُربعة أو مُدورة (round or square) [?]، هذا يُعطي المُهندس مدى واسع من القياسات (الحجوم) (sizes) والترتيبات من أجل اختيار التصميم المُناسب .

### 1.16.1 الحديد النقي

### 2.16.1 الخليطةFe36Ni

### 3.16.1 الخليطةFe50Ni

إن الخلائط Fe50Ni موجودة في السوق بأسماء تجارية مُختلفة: Deltamax.anhister.permalloy B. Isoperm Flux.Hypernic. B.high




الشكل 38.1: حلقات البطاء لخليطة $65\%Ni - 35\%Fe$ بالتلدين بوجود حقل مغنطيسي وبدونه (Bozorth 1951) [?].

### 4.16.1 الخليطةFe80Ni

## 17.1 العيوب البلورية

### 1.17.1 أنواع العيوب البلورية

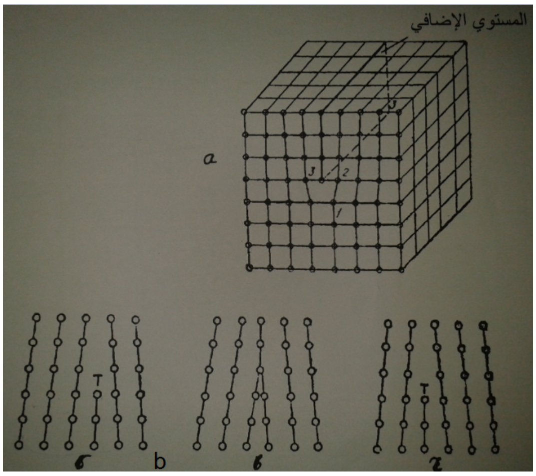
تُقسم العيوب البلورية في الجسم الصلب إلى عيوب نقطية وعيوب خطية:

#### 1.1.17.1 العيوب النقطية

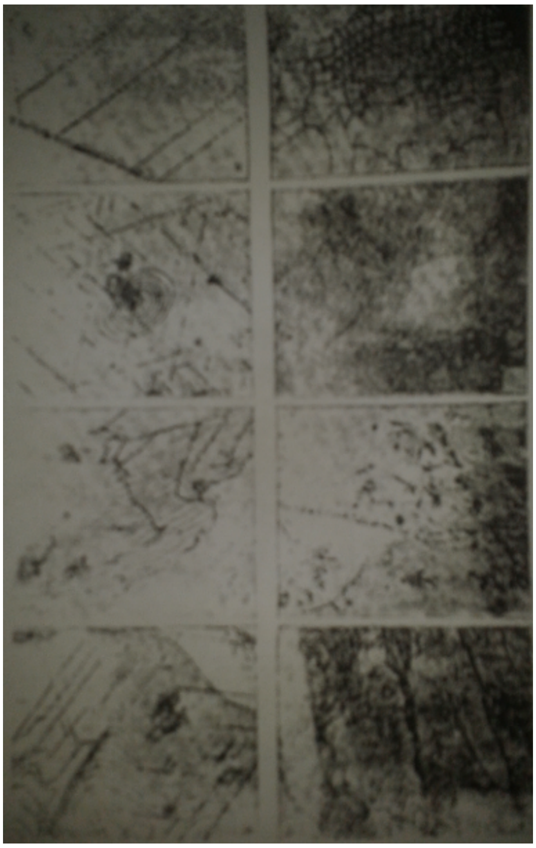
تُقسم العيوب النقطية إلى صنفين: هُما الشوائب و العيوب النقطية الأصلية [?].
حيث أن الشوائب عبارة عن ذرات داخلية يكون لها تأثير كبير على الخواص المغنطيسية و الميكانيكية و الحرارية في الأجسام الصلبة [?].
أما العيوب النقطية الأصلية فتُقسم إلى: الفجوة والحشوة.
حيث أن الفجوة هي نقص ذرة من مكانها الأصلي في الشبكة البلورية، و وضع ذرة إضافية على السطح حيث تتشكل الفجوات في مُركب أيوني فينبغي أن يُحافظ على الإعتدال الكهرُبائي بشكل ما داخل الحجم الذي يحتوي على كُل فجوة. أما الحشوة فهي ذرة حُشرت في داخل الشبكة البلورة [?].
يُلاحظ أنهُ مع إرتفاع درجة الحرارة يزداد عدد إنتقال الذرات كما يزداد عدد الفراغات.

#### 2.1.17.1 العيوب خطية

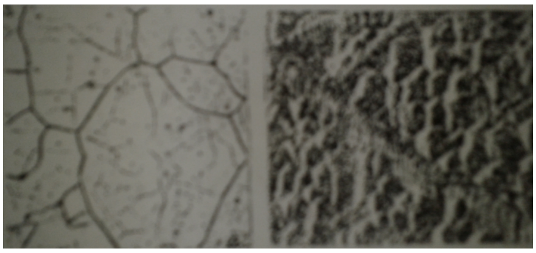
تُدعى العيوب الخطية في البلورة بالخلوع. فالخلع هو خط من الذرات ذات إحداثيات مُختلفة عن الذرات الأُخرى في البلورة [?].
تعتمد المواصفات الميكانيكية للمعدن على عدد الإنخلاعات وقابليتها للإنزلاق كما في الشكل() حيث يُظهر تشكل نصف مستوي إضافي في الشبكة البلورية وانتقاله عبر الشبكة [?].
إن الإنخلاعات لا تنتقل من تلقاء ذاتها حيث يؤدي تطبيق إجهاد صغير إلى إنتقالها وتشكيل خط إنزلاق [?].
يُمكن مُشاهدة خطوط الإنخلاعات بالمجهر الضوئي كما في الشكل () [?].
حيث تتألف وحدات المعدن من وحدات مُستقلة صغيرة تُسمى الوحدات الفُسيفسائية كما في الشكل () [?].
إن تغير أبعاد و اتجاه هذه الوحدات أثناء العمليات التكنولوجية يؤدي إلى تغير مواصفات المعدن.




الشكل 39.1: (a) الانخلاع في الشبكة البلورية. (b) و انتقاله عبر الشبكة [?].

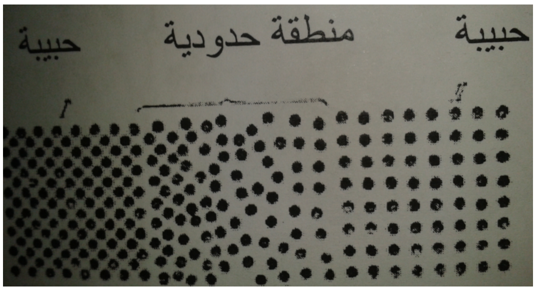


الشكل 40.1: أشكال الانخلاعات الشبكية [?].



الشكل 41.1: البنية الميكروية الدقيقة للفولاذ قليل الكربون: (a) حُبيبة الفيريت (الخطوط الغليظة)، والقطاعات (الخطوط الرفيعة) X250 . (b) الوحدات الفسيفسائية لحبيبة الفيريت، و حدود القطاعات X16000 [?].

تؤلف مجموعة الفسيفسائية مع بعضها ما يُسمى بالقطاعات [?].




الشكل 42.1: توضع الذرات داخل وعلى حدود الحبيبات [?].

وهكذا نجد أن البنية الفعلية للمعدن تتضمن نوعين من العيوب [?]:
أولاً: على المستوى الذري البلوري : نقطية وانخلاعات.
ثانياً: على المستوى البنيوي: وحدات وقطاعات.

### 2.17.1 تأثير الشوائب على الخواص المغنطيسية

الخواص المغنطيسية تعتمد على حجم الحبوب وأكسدة حدود الحُبيبات [?].

تتحرك جدران بلوخ (المجال) بسهولة في مادة مُتجانسة جداً. العيوب البلورية مثل حدود الحُبيبات و الشوائب و الرواسب هي عوائق لحركة جدران بلوخ. لذا المغنطيسيات اللينة تُعالج لإحتوائها على بضعة عيوب [?].

أفضل الخواص المغنطيسية مُكتسبة بالتلدين بالهيدروجين من $(1000 - 1200°C)$ لعدة ساعات لتخفيض محتوى الأوكسجين و الكربون والنتروجين والكبريت في المادة. محتويات الكبريت أعلى من عدة (ppm) والكربون يتجاوز (20ppm) هذا ضار للخواص المغنطيسية للمادة [?].

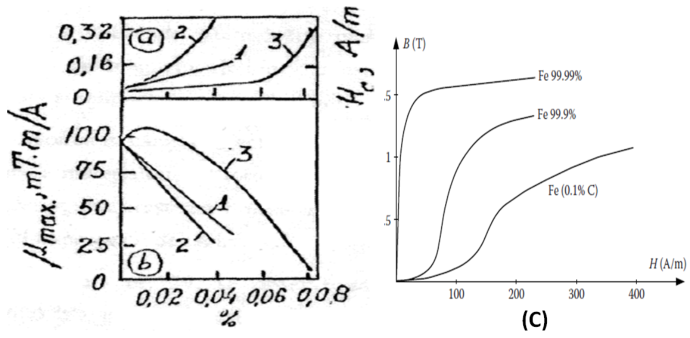
إن وجود الأوكسجين و الفوسفور و الكبريت يُخفض الخواص المغنطيسية ل Fe50%Ni بشدة (نقصان النفاذية و زيادة الحقل القاهر) كما في الشكل() [1].

<u>الأوكسجين:</u>

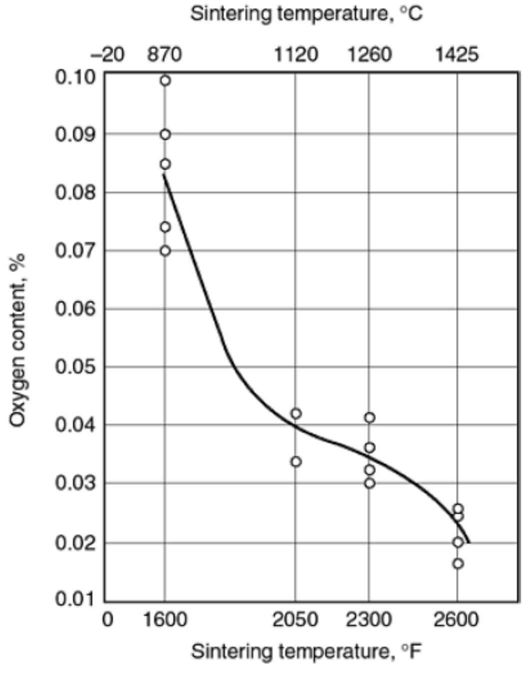
إن أغلب المساحيق تكون مُرذذة بالماء لها مساحة سطحية كبيرة (large surface area) . إن الأوكسجين يُصبح مُشكلة رئيسية في الخلائط المغنطيسية للمساحيق المعدنية [?].

في الحديد وحديد الفوسفور، الأوكسجين ينخفض لمستويات مُنخفضة باختيار جو الهيدروجين و لذلك اختيار الهيدروجين كجو للفرن ضروري وإلا لا تخفيض للأوكسجين سيحدث. بالإضافة لذلك التلبيد بدرجة حرارة عالية يجب أن يؤخذ بعين الإعتبار، حيث يُظهر الشكل () تأثير درجة حرارة التلبيد على تخفيض الأوكسجين للأجزاء و التي تُلبد بالهيدروجين [?].

<u>الكربون:</u>




الشكل 43.1: يُبين الشكل تأثير الشوائب: (1) الأوكسجين. (2) الكبريت. (3) الفوسفور: على كلا من (a) الحقل القاهر و (b) النفاذية المغنطيسية. للخليطة Fe50%Ni [1]. (c) تأثير نسبة الكربون على مُنحني المغنطة الإبتدائي للحديد [8].



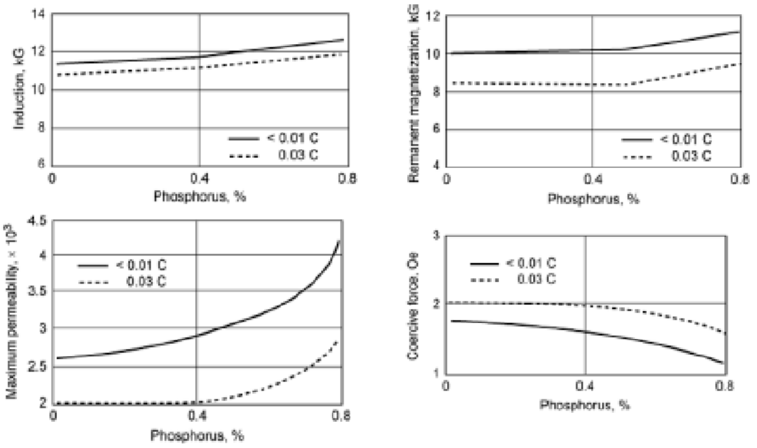

الشكل 44.1: تأثير درجة حرارة التلبيد على محتوى الأوكسجين [?].

يُقدم عموماً إلى المادة بالإحتراق الغير صحيح (بالتخلص الغير صحيح) لزيت التشحيم أو اختيار جو التلبيد ناشر للحرارة (exothermic) أو ماص للحرارة (endothermic) [?].

حيث بقاء كميات صغيرة من زيت التشحيم محصور في المادة ستُخفض الخواص المغنطيسية بشدة.

مُعظم مُصنعوا المواد المغنطيسية استخدموا أفران مُخصصة لتلبيد الأجزاء المغنطيسية ويختارون أجواء وقائية لا تتضمن الكربون. الكربيدات ستنخفض لمستويات مُنخفضة باختيار جو الهيدروجين ولذلك اختيار الهيدروجين كجو للفرن ضروري وإلا لا تخفيض للكربيدات سيحدث.

إن الأشكال الأتية () تُعرض تأثير كمية صغيرة من الكربون و الفوسفور على الخواص المغنطيسية [?].

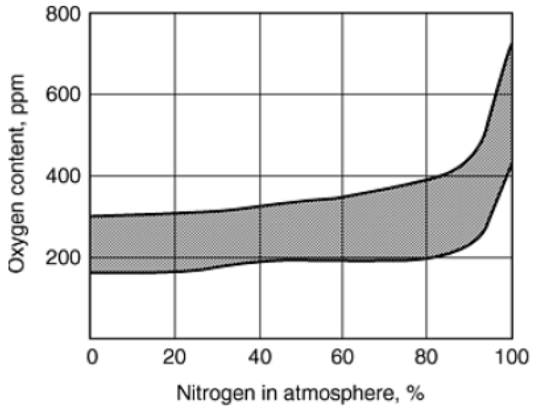



الشكل 45.1: تأثير الكربون و الفوسفور على الخواص المغنطيسية [?].

النتروجين:

وهو مُلوث أخر يضر بالخواص المغنطيسية الحساسة للبنية. كما هو حال الكربون، قابلية ذوبان النتروجين $0.006\mathrm{wt}\%$ . أي كمية أكبر من هذه يُسبب نتريدات لتترسب في المحلول [?].

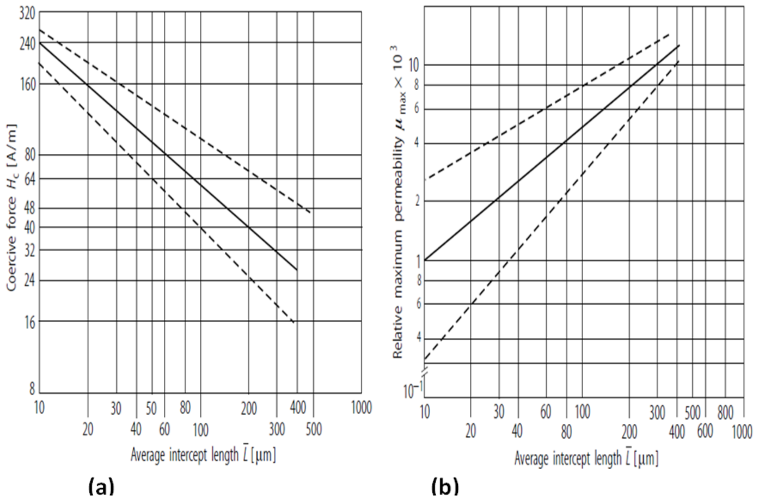
بالتبريد هذه الكمية من الكربون والنتروجين لا يُمكن أن يبقيا في المحلول الصلب، لذا مع الزمن الكربيدات والنتريدات يترسبان كطور ثاني. عندما هذا يحدث الخواص المغنطيسية الحساسة للبنية تنخفض بشدة [?]. أن النتروجين ومزيج (النتروجين و الهيدروجين) والأمونيا المعزول لايجب اعتبارها أجواء وقائية لفرن التلبيد. حيث أن جو النتروجين هو السبب الرئيسي لنتروجين الملوث في الحديد و حديد الفوسفور بالإضافة أن جو النتروجين لايقوم بتخفيض الأوكسيدات السطحية كما في الشكل(). لذلك لتخفيض النتريدات نختار جو الهيدروجين.




الشكل 46.1: تأثير جو النتروجين على محتوى الأوكسجين في المادة [?].

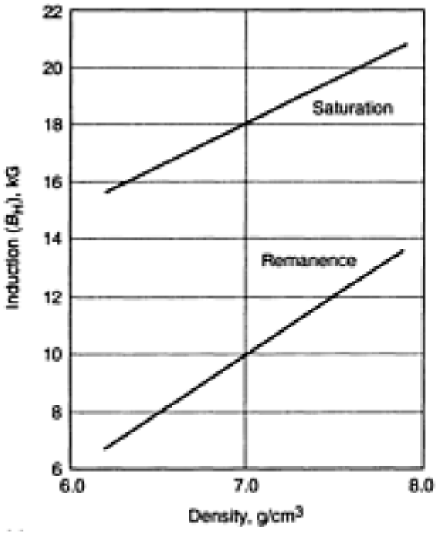
### 3.17.1 تأثير المسامية على الخواص المغنطيسية

يتعلق التحريض المتبقي ومغنطة الإشباع للحديد المُلبد بشكلٍ أساسي بكثافة المادة، في حين تكون النفوذية المغنطيسية والحقل القاهر حساسة جداً بالبنية [10] [?]، كما في الشكل ().




الشكل 47.1: (a) الحقل القاهر كتابع للجزء المحصور (intercept) لحجم الحُبيبات المتوسط. (b) النفاذية العُظمى كتابع للجزء المحصور (intercept) لحجم الحُبيبات المتوسط [10].

تتأثر الخواص المغنطيسية بوجود المسامات حيث تكون النفوذية المغنطيسية والحقل القاهر حساسة جداً لحجم المسامات وشكلها وتوزعها ولكمية الشوائب أيضاً، فالمسامات هي عبارة عن كمية أقل من المادة النشطة مغنطيسياً ستكون في واحدة الحجم (فالمسامات ليست إلا غياب للمادة الممغنطة)، ونتيجة لحدوث تغير في توزيع التدفق المغنطيسي أيضاً [9]. وتكون العلاقة بين كُل من التحريض المغنطيسي والمغنطة المتبقية من جهة وبين كثافة المُلبد من جهة ثانية علاقة خطية كما في الشكل () حيث أن كثافة أعلى تؤدي إلى تحريض مغنطيسي أعلى ومغنطة متبقية أعلى [?] [9].




الشكل 48.1: تأثير الكثافة على التحريض المغنطيسي في عينة من الحديد الملبد [?].

تتراوح كثافة العينات المُلبدة بين $\%(70-95)$ من الكثافة الكُلية للمُنتج المُصمت وذلك اعتماداً على تقنية التصنيع ونوع التطبيقات [9].

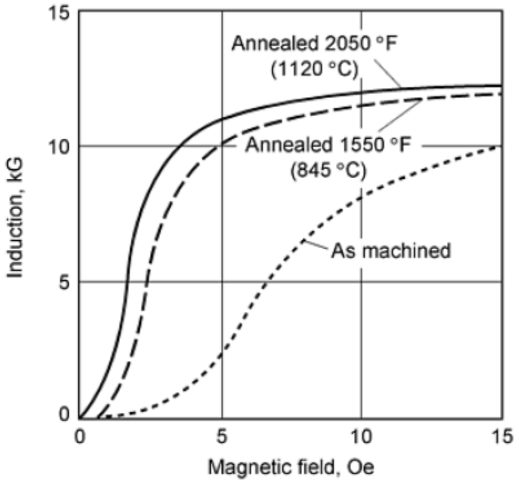
كما ويؤثر شكل المسام واحتوائها على الشوائب وكذلك حجم الدقائق وتصلدها تأثيراً كبيراً على الخواص المغنطيسية للمواد الملبدة. فوجود الزوائد والخدوش مثلاً على أسطح الدقائق يؤدي إلى إزالة المغنطة ولذلك كلما اقترب شكل الفجوات من الشكل الكروي كلما قل تأثيرها على إزالة المغنطة وكلما زادت القيمة العظمى للنفاذية المغنطيسية وذلك من أجل قطع متساوية المسامية. وللحصول على خواص مغنطيسية عالية يُفضَّل أن تكون كمية الفجوات أقل ما يمكن وذلك لكل قيمة معينة من المسامية، وعليه فيفضل وجود الفجوات الكبيرة دون الصغيرة [14].

لا تعتمد النفوذية المغنطيسية للقطع المُلبدة على مسامية المادة فقط ولكنها تعتمد كذلك على شروط التلبيد وعلى خواص المساحيق المستخدمة والتي يُمكن أن تؤدي إلى تغير القيمة العظمى للنفاذية المغنطيسية إلى الضعف عند تساوي المسامية [14].

### 4.17.1 تأثير الإجهادات على الخواص المغنطيسية

تظهر الإجهادات الميكانيكية بعد القيام بأي عملية ثانوية (عمليات التشغيل، إعادة الكبس، .....). تؤثر الإجهادات الميكانيكية تأثيراً كبيراً على الخواص المغنطيسية للمادة فتُخفضها. لذا تُلدن لإزالة الإجهادات الميكانيكية الناتجة عن العمليات الثانوية (الشكل).

حيث مُعظم مُصنعوا المواد يُعالجون الأجزاء المُجهدة خلال فرن التلبيد، وباستخدام غاز الهيدروجين وذلك للحصول على خواص مغنطيسية عظمى [?].




الشكل 49.1: الخواص المغنطيسية للحديد 1– بعد عملية التشغيل. 2– بعد تلدين العينة عند درجة حرارة 845°C. 3– بعد تلدين العينة عند درجة حرارة 1120°C [?].

## 18.1 الأنواع المُختلفة للمحولات

هُنالك ثلاثة ترتيبات لتصميم التجاري لإستخدام مادة الصفيحة (sheet): صفائح رقيقة (laminations) و الأنوية المقصوصة (المقطوعة) (cut cores) وأنوية شريطية (حلقية) (tape would (toroidal) cores) [?].

صفائح الرقيقة (lamination): عادة السماكة حوالي (0.014–0.06) إنش من أجل إمكانية العمل في التواترات التالية: من 60 إلى 400 هرتز. هُم يكونوا على الأشكال مثل: EI - EE - F - DU.

إن شكل الصفيحة الرقيقة DU (lamination DU) يُشبه كثيراً الحلقة (toroidal) ويُفضل إشباع الأدوات (devices) التي تستخدم مواد ذات حلقة مُربعة (square loop) [?].

أما أشكال الصفائح الرقيقة الأُخرى (other lamination shape) لها فائدة أفضل لأنها تستخدم فسحة الهوائية (الفراغ) (space) و هي مُفضلة للأدوات التي تتطلب نفاذية عالية [?].

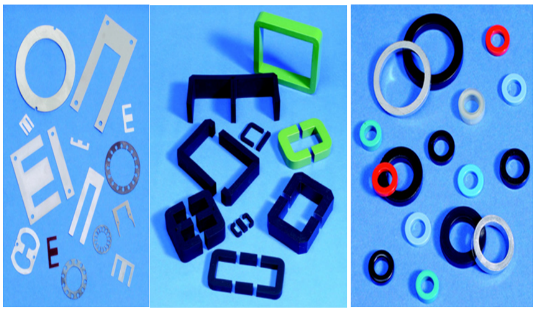
الأنوية المقصوصة (المقطوعة) ( cut cores) تمتلك الأشكال التالية:
E - O - C وعموماً تلتف (wound) من مادة فجوة رقيقة (thin gage material) تتراوح من 0.001 إلى 0.004 إنش، وإمكانية العمل عند التواترات 25 كيلو هرتز عند سماكة 0.01 إنش لمادة البيرمالوي 4-79 MO [?].
أنوية اللفائف الشريطية (Tape wound cores) طورت للإستعمال في المُضخمات (المُكبرات) المغنطيسية. الأن هُم يُستعملون بشكل رئيسي في المحولات والأنفرترات.
تكون سماكتهم عموماً 0.001 – 0.002 – 0.004 إنش، كذلك 0.006 – 0.014 إنش للمواد غير الشائعة [?].
إن خواص خلائط الحديد لبعض المواد الأكثر شعبية كما في الجدول().

Materials for laminations, cut cores and tape wound cores

| Alloy type | $\mu_i$ $\times 10^{-3}$ | $\mu_m$ $\times 10^{-3}$ | $H_c$ (Oe) | $H_c$ (A/cm) | $B_s$ (kG) | $B_r$ (kG) | $\frac{B_r}{B_m}$ | $T_c$ (°C) | Resistivity ($\mu\Omega$ cm) | Density (g/cm³) | Notes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *High initial $\mu$* | | | | | | | | | | | |
| 36Ni | 3 | 20 | 0.2 | 0.16 | 13 | | | 250 | 75 | 8.15 | a) |
| 48Ni | 11 | 80 | 0.03 | 0.024 | 15.5 | | | 480 | 48 | 8.25 | b) |
| 56Ni | 30 | 125 | 0.02 | 0.016 | 15 | | | 500 | 45 | 8.25 | c) |
| 4Mo–80Ni | 40 | 200 | 0.015 | 0.012 | 8.0 | | | 460 | 58 | 8.74 | d) |
| 4Mo–5Cu–77Ni | 40 | 200 | 0.015 | 0.012 | 8.0 | | | 400 | 58 | 8.74 | e) |
| 5Mo–80Ni | 70 | 300 | 0.005 | 0.004 | 7.8 | | | 400 | 65 | 8.77 | f) |
| 4Mo–5Cu–77Ni | 70 | 300 | 0.005 | 0.004 | 8.0 | | | 400 | 60 | 8.74 | g) |
| *Square loop* | | | | | | | | | | | |
| 4Mo–80Ni | | | 0.03 | 0.024 | 8.0 | 6.6 | 0.80 | 460 | 58 | 8.74 | h) |
| 4Mo–5Cu–77Ni | | | 0.03 | 0.024 | 8.0 | 6.6 | 0.80 | 400 | 58 | 8.74 | i) |
| 3Mo–65Ni | | | 0.025 | 0.02 | 12.5 | 10.5 | 0.94 | 520 | 60 | 8.50 | j) |
| 50Ni | | | 0.10 | 0.08 | 16.0 | 15.0 | 0.95 | 500 | 45 | 8.25 | k) |
| 3Si | | | 0.40 | 0.32 | 20.3 | 16.3 | 0.85 | 730 | 50 | 7.65 | l) |
| 2V–49Co | | | 0.20 | 0.16 | 23.0 | 20.1 | 0.90 | 940 | 26 | 8.15 | m) |
| *Skewed (flat) loop* | | | | | | | | | | | |
| 4Mo–5Cu–77Ni | | | 0.016 | 0.012 | 8.0 | 1.2 | | 400 | 58 | 8.74 | n) |
| 3Mo–65Ni | | | 0.12 | 0.10 | 12.5 | 1.5 | | 520 | 60 | 8.50 | o) |

الشكل 50.1: الخواص المغنطيسية لخلائط الحديد على شكل صفائح رقيقة و أنوية مقصوصة (مقطوعة) و أنوية اللفائف الشريطية [?].

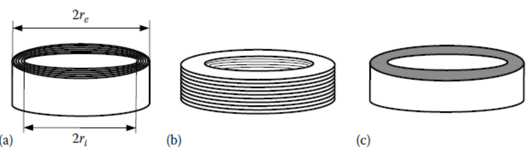
يُظهر الشكل () أمثلة عن الأنوية الحلقية مُحضرة عن طريق لف (شريط (Ribbon) أو لف شريط (Tape)) الشكل ()، أو طبقات من صفائح رقيقة مُتراصة (punching the ring shaped) الشكل(). أو بودرة المغنطيسية (bonding from magnatic powder) الشكل() [8].



(a) (b) (c)

الشكل 51.1: الأنواع المُختلفة لأنوية المحولات: (a) صفائح رقيقة (lamination). (b) أنوية المقصوصة (المقطوعة) ( cut cores). (c) أنوية حلقية.

إن الطريقة الأولى استُعملت كثيراً لأنها تمكن من كسب أفضل أداء للمادة الإنزتروبية في الاتجاه المُختار (عادةً في اتجاه اللف (rolling direction). هذا النوع من العينة يبدو قريباً من الحالة المثالية – الدارة المغنطيسية المُغلقة، بالأبعاد المعروفة، يتضمن طول الطريق المغنطيسي و يساوي ($2\pi.r_0$).




الشكل 52.1: أمثلة عن الأنوية الحلقية مُحضرة عن طريق (a) لف شريط. (b) طبقات من صفائح رقيقة مُتراصة. (c) البودرة المغنطيسية [8].

حيث $r_0 = \frac{(r_e+r_i)}{2}$ (نصف القطر المتوسط $(\mathrm{r_0})$ نصف القطر الخارجي $(\mathrm{r_e})$ نصف القطر الداخلي $(\mathrm{r_i})$) [8].
إن الحقل المغنطيسي في العينة نفسها ليس موحد (مُتماثل) على كامل العينة، هو أكبر قرب القطر الداخلي وينقص بشكل لا خطي مع المسافة حتى القطر الخارجي. لهذا يُمكن أن نُحدد طول الطريق المغنطيسي [8]:

$$L = 2\pi.\frac{(r_e + r_i)}{2}$$

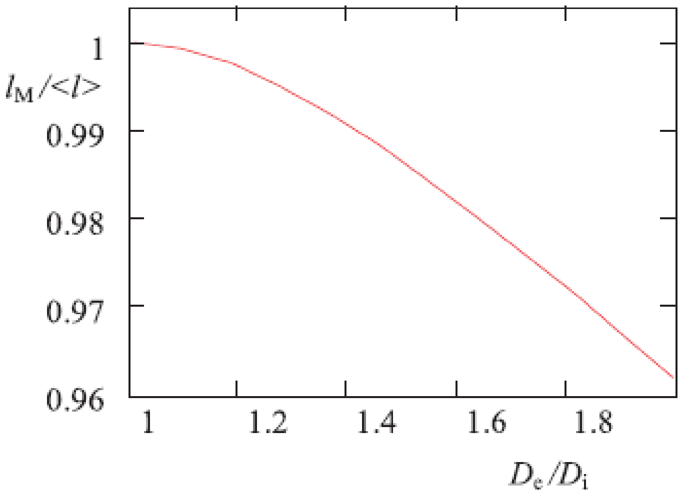
فقط إذا حقق الشرط $r_e/r_i < 1.1$ طبقاً لمعيار (IEC60404–4) .
أما إذا كانت هذه النسبة بين $1.1 < D_e/D_i < 1.6$ طول الطريق المغنطيسي يُمكن أن يُحدد [8]:

$$L_M = \pi.(r_e - r_i)/\ln(r_e/r_i)$$

عندها قيمة الحقل المغنطيسي تُحدد بالعلاقة:

$$H = 1/(r_e - r_i)\int_{r_i}^{r_e} H\,\mathrm{d}r = \frac{n.I}{2\Pi(r_e - r_i)}\int_{r_i}^{r_e} \frac{dr}{r}$$

$$H = \frac{n.I}{2\Pi(r_e - r_i)}\ln\frac{r_e}{r_i}$$




الشكل 53.1: نسبة $\frac{\mathrm{L_M}}{\mathrm{L}}$ بدلالة نسبة $\frac{\mathrm{D_e}}{\mathrm{D_i}}$ [?].

إذا كانت هذه النسبة $r_e/r_i > 1.6$ لا يُنصح بها بسبب الحقل المغنطيسي الغير مُنتظم (مُتماثل) في العينة، حيث قام Nakata et al (1992) بتحليل هذا الخطأ لقيم مُختلفة من نسبة $r_e/r_i$.

إذا تجاوزت هذه النسبة 1.5 سيكون هُنالك خطأ في تحديد B أو H و هذا هام خصوصاً بالمغنطة المُنخفضة. اقترح Nakata et al طريقة زيادة عددية خاصة التي تُمكن من تخفيض هذه الأخطاء عندما العينة لها نسبة غير مألوفة $r_e/r_i$. (من أجل $(r_e/r_i > 3)$).

شدة الحقل $H_x$ في المسافة x من نصف القطر المتوسط $r_0$ (حيث نفترض الحقل $H_0$) يُمكن أن يُحدد من تعبير Grimmond et al (1989) [8]:

$$H_x = \frac{H_0.r_0}{(r_0 + x)}$$

وبناءً على ذلك الحقل المغنطيسي في السطوح الخارجية والداخلية:

$$H_i = \frac{H_0.(r_e + r_i)}{(2r_i)}$$

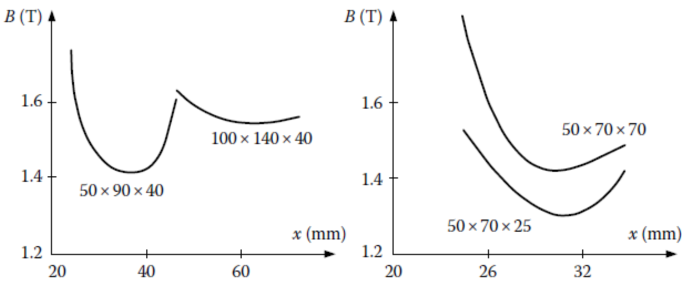
$$H_e = \frac{H_0.(r_e + r_i)}{(2r_e)}$$

وهذا يعني:

$$\frac{H_i}{H_e} = \frac{r_e}{r_i}$$

حيث هذه النتائج أتت من التجارب، حيث توزيع B و H في نصف القطر الحلقة يكون لاخطي.

تتصح المعايير المذكورة أعلاه قيمة $r_e/r_i$ على الرغم من أن العوامل الهندسية الأُخرى كالقطر الداخلي وارتفاع العينة أيضاً يؤثرون على برامترات القياس. هذه المُشكلة حُلت عن طريق Grimmond, Ling, and Moses [8]. هُم قاسوا الضياعات في النفاذية، والتيار المغنطيسي (المغنطة) لعينات ذات أبعاد مُختلفة واستنتجوا بأن النتائج يُمكن أن تكون مُختلفة والتي حُصلت عليها باستعمال طُرق أُخرى الشكل () يُظهر النتائج التجريبية لتحديد توزع كثافة التدفق بواسطة استخدام وشائع (ملفات) بحث خاصة (by using a special search coils) من النتائج التي أُظهرت في الشكل (). من الواضح أن العينة الحلقية يجب أن يكون قطرها الداخلي كبير وعرض الشريط كبير (أرتفاع الحلقة) large strip width (ring height). أن الحلقة تبدو الشكل المثالي لعينات الإختبار المغنطيسية، إلا أنهُ لهُ

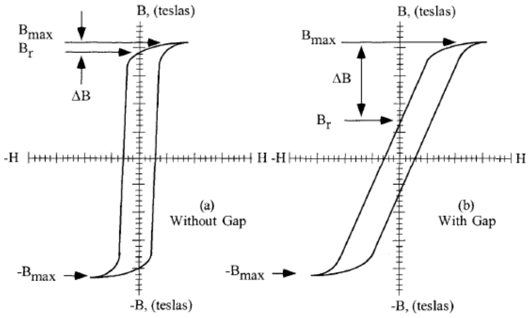



الشكل 54.1: توزيع كثافة التدفق مُحدد بشكل تجريبي في العينات الحلقية للإرتفاعات والأقطار الداخلة المُختلفة (العينات ذات الأبعاد $D_i \times D_e \times h$) [8].

بعض الأضرار التي يجب أن تؤخذ بالحُسبان.

إن الفائدة الرئيسية في استخدام الحلقة غياب الفجوة الهوائية في النواة وذلك لأن لها تأثير قوي على إزالة المغنطة وهذا أدى إلى قص (shared over) حلقة البطاء و إنخفاض كبير في النفاذية المواد ذات النفاذية العالية. بالإضافة أن الفجوة الهوائية تزيد الطول الفعال للطريق المغنطيسي.

إن عرض النصف القطر width radial مُقارن مع القطر المتوسط للحلقة، حيث أن المُحيط الخارجي للحلقة أكبر من المُحيط الداخلي، عدد اللفات لكل واحدة طول أقل على الخارج من الداخل، ونتيجةً لذلك قوة التمغنط غير مُتماثلة (مُنتظمة) عبر المقطع.




الشكل 55.1: مُقارنة المواد المغنطيسية بوجود فجوة هوائية وبدونها [?].

يُظهر الجدول () نسبة الحقل المغنطيسي المتوسط $(H_0)$ على الحقل المغنطيسي في مركز المقطع للحلقات ذات المقطع الدائري أو المُستطيل $(H_R)$ ، عادةً يُنصح أن تكون النسبة بين عرض النصف القطر radial width (a) و القطر المتوسط للحلقة (R) أصغر أو تساوي 0.1 لنضمن نتائج أكثر دقة [?].

يُرمز لنسبة بين عرض النصف القطر radial width (a) و القطر المتوسط للحلقة (R) بالرمز $(p = \frac{a}{R})$.

| p | $\frac{H_o}{H_R}$ | |
|---|---|---|
| | Rectangular | Circular |
| $\frac{1}{2}$ | 1.0986 | 1.0718 |
| $\frac{1}{3}$ | 1.0397 | 1.0294 |
| $\frac{1}{4}$ | 1.0216 | 1.01625 |
| $\frac{1}{5}$ | 1.0137 | 1.0102 |
| $\frac{1}{6}$ | 1.0094 | 1.0070 |
| $\frac{1}{7}$ | 1.0069 | 1.00515 |
| $\frac{1}{8}$ | 1.0052 | 1.0040 |
| $\frac{1}{16}$ | 1.0033 | 1.0025 |
| $\frac{1}{19}$ | 1.0009 | 1.0007 |

الشكل 56.1: نسبة الحقل المغنطيسي المتوسط على الحقل المغنطيسي في مركز المقطع للحلقات ذات المقطع الدائري أو المُستطيل من أجل نسب مختلفة من عرض النصف القطر على القطر المتوسط للحلقة [?] [6].

يُظهر الشكل المقطع المحوري للحلقة من أجل المقطع الدائري و المُستطيل. أُستنتجت مُعادلة المقطع العرضي الدائري للحلقة من قبل (Kirchhoff) ، أما مُعادلة المقطع العرضي المستطيلي للحلقة أُستنتجت من قبل (stoletow) [?].

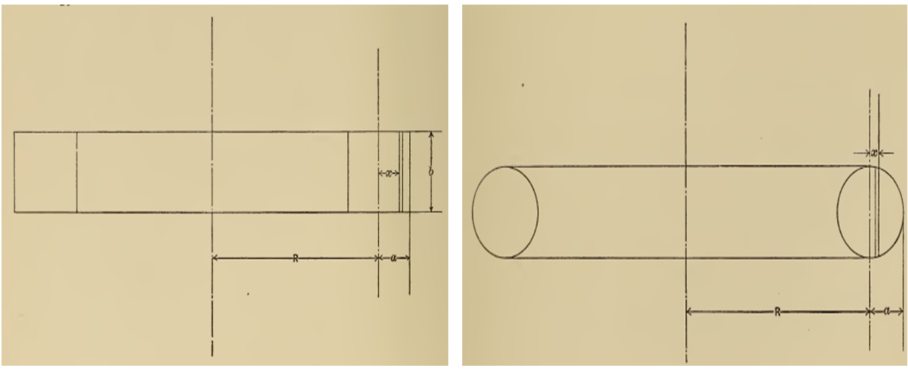
من أجل حساب نسبة قيمة الحقل المغنطيسي المتوسط على قيمة الحقل المغنطيسي في مركز المقطع لحلقة دائرية نقوم بدايةً بحساب التدفق المغنطيسي لحلقة بسيطة ثخانتها (dx) [?]:

$$d\phi = \frac{4\pi NI}{2\pi(R+x)/2ydx} = \frac{4NI}{R+x}\sqrt{a^2-x^2}dx$$

$$\phi = 4NI\int_{-a}^{a}\frac{\sqrt{a^2-x^2}}{(R+x)} = 4\pi NI(R-\sqrt{R^2-a^2})$$

حيث إن قيمة الحقل المغنطيسي المتوسط تُعطى بالعلاقة:

$$H_0 = \frac{\phi}{\pi.a^2}$$




(a) (b)

الشكل 57.1: (a) المقطع العرضي لحلقة ذو مقطع مُستطيلي. (b) المقطع العرضي لحلقة ذو مقطع دائري [?].

أما قيمة الحقل المغنطيسي في مركز المقطع تُعطى بالعلاقة:

$$H_R = \frac{4\pi NI}{2\pi R} = \frac{2N.I}{R}$$

و نسبة قيمة الحقل المغنطيسي المتوسط على قيمة الحقل المغنطيسي في مركز المقطع تُعطى بالعلاقة:

$$\frac{H_0}{H_R} = 2R/a^2(R - \sqrt{R^2 - a^2}) = \frac{2}{p^2}(1 - \sqrt{1 - p^2})$$

$$\frac{H_0}{H_R} = 1 + \frac{p^2}{4} + \frac{p^4}{8} + \frac{5p^6}{64} + \frac{7p^8}{128} + .....$$

أما من أجل حساب نسبة قيمة الحقل المغنطيسي المتوسط على قيمة الحقل المغنطيسي في مركز المقطع لحلقة مُستطيلة نقوم كما في السابق بحساب التدفق المغنطيسي للحلقة [?]:

$$d\phi = \frac{4\pi NI}{2\pi(R + x)/bdx} = \frac{2bNIdx}{R + x}$$

$$\phi = 2bNI \int_{-a}^{a} \frac{dx}{(R + x)} = 2NIb \log \frac{1 + p}{1 - p}$$

باعتبار (b) ارتفاع الحلقة.

حيث إن قيمة الحقل المغنطيسي المتوسط تُعطى بالعلاقة:

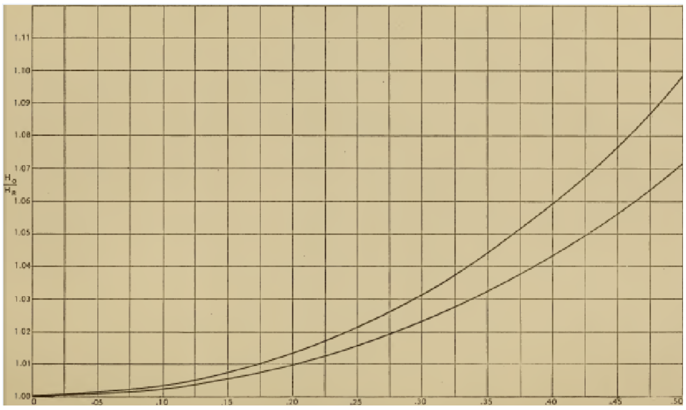
$$H_0 = \frac{\phi}{2.a.b} = \frac{N.I}{a} \log \frac{1 + p}{1 - p}$$

أما قيمة الحقل المغنطيسي في مركز المقطع تُعطى بالعلاقة:

$$H_R = \frac{4\pi NI}{2\pi R} = \frac{2N.I}{R}$$

و نسبة قيمة الحقل المغنطيسي المتوسط على قيمة الحقل المغنطيسي في مركز المقطع تُعطى بالعلاقة:

$$\frac{H_0}{H_R} = 1/2p \log \frac{1 + p}{1 - p}$$




الشكل 58.1: نسب مختلفة من عرض النصف القطر على القطر المتوسط للحلقة من أجل نسبة الحقل المغنطيسي المتوسط على الحقل المغنطيسي في مركز المقطع، للحلقات ذات المقطع الدائري (المُنحني السُفلي) أو المُستطيل (المُنحني العلوي) [?].

إذا رسمنا القيم المعطية بالجدول (). نُلاحظ أن قيم $(\mathrm{H_0})$ تختلف عن $(\mathrm{H_R})$ عندما المقطع دائري، أكثر من عندما المقطع مُستطيل من أجل القيم $(\mathrm{p} = \frac{\mathrm{a}}{\mathrm{R}})$ نفسها.

حيث يُظهر الجدول() النسبة المئوية للخطأ في تحديد نسبة الحقل المغنطيسي المتوسط $(\mathrm{H_0})$ على الحقل المغنطيسي في مركز المقطع للحلقات ذات المقطع الدائري أو المُستطيل $(\mathrm{H_R})$ من أجل النسب المُختلفة من عرض النصف القطر width radial $(\mathrm{a})$ على القطر المتوسط للحلقة $(\mathrm{R})$.

حيث كما ذُكر سابقاً يُنصح أن تكون النسبة بين عرض النصف القطر width radial $(\mathrm{a})$ على القطر المتوسط للحلقة $(\mathrm{R})$ أصغر أو تساوي $0.1$ لنضمن نتائج أكثر دقة [?].

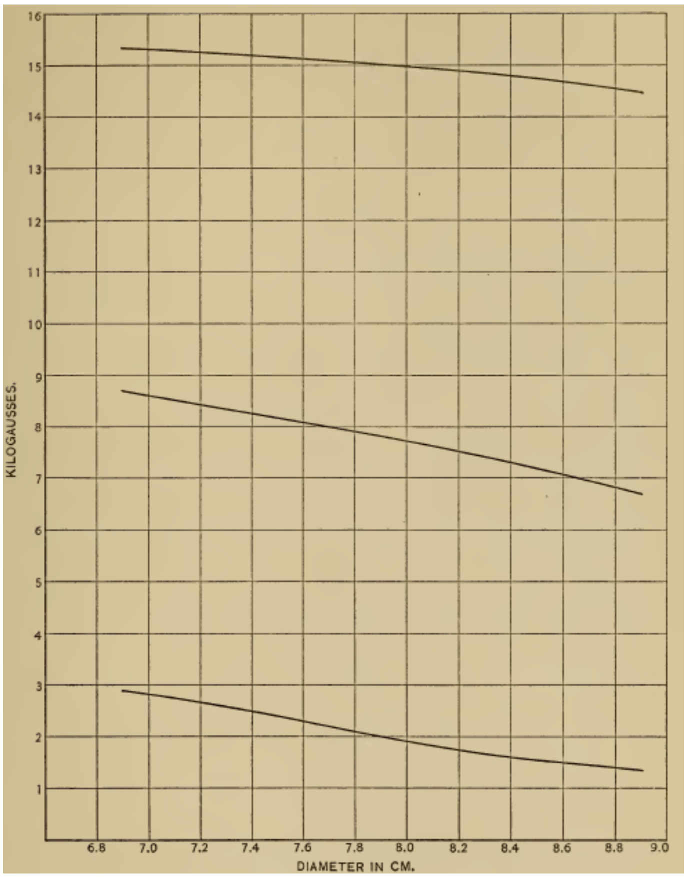
| Per Cent Error | Rectangular | | Circular | |
|---|---|---|---|---|
| | p | 1/p | p | 1/p |
| 0.1 | 0.055 | 18.2 | 0.067 | 14.9 |
| 0.2 | .077 | 13.0 | .090 | 11.1 |
| 0.5 | .120 | 8.3 | .138 | 7.2 |
| 1.0 | .172 | 5.8 | .200 | 5.0 |
| 2.0 | .240 | 4.2 | .277 | 3.6 |

الشكل 59.1: النسبة المئوية للخطأ في تحديد نسبة الحقل المغنطيسي المتوسط على الحقل المغنطيسي في مركز المقطع للحلقات ذات المقطع الدائري أو المُستطيل من أجل النسب المُختلفة من عرض النصف القطر width radial على القطر المتوسط للحلقة [?].

## 19.1 الأخطاء الناتجة عن قياس الخواص المغنطيسية للحلقة والتي يجب تجنبها

عندما نقيس كثافة التدفق في العينة، عادةً نحنُ قادرين على تحديد المقطع العرضي للحلقة بدقة تامة. لأن سماكة العينة يُمكنهُ أن يُغير طول الطريق المغنطيسي L نحنُ نستطيع أن نُحدد المقطع العرضي المتوسط من الكتلة m (عن طريق وزن العينة ويُنصح بها في المعيار $(\mathrm{IEC\ 60404\text{-}2})$ و بمعرفة كثافة المادة $(\rho)$ [8]:

$$A = \frac{m}{L.\rho}$$



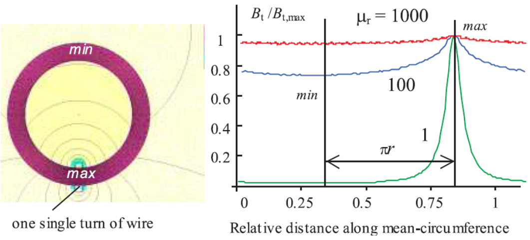

الشكل 60.1: تغير كثافة التدفق المغنطيسي مع تغير المسافة عن محور الحلقة، من أجل ثلاثة قيم مُختلفة لتيار المغنطيسي (المغنطة) [?].

تحدث الأخطاء المقيسة لكثافة التدفق إذا لفات الوشائع ليست مُلتفة قريبة من سطح العينة. في هذه الحالة التدفق الكامل مُنقسم إلى قسمين في العينة في المنطقة $A_Fe$، وفي الوشيعة المنطقة $A_c$ [8]:

$$\phi = n.A_Fe + n.(A_c - A_Fe).\mu_0.H$$

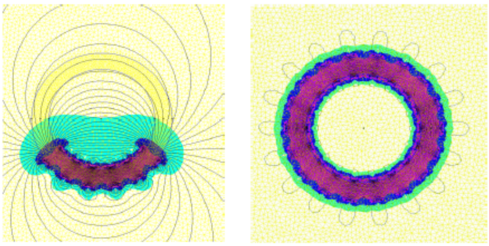
إذا نحنُ افترضنا بأن كثافة التدفق في العينة هي $(\phi/n.A_Fe)$ الخطأ يكون :

$$\Delta B = (\frac{A_c}{A_Fe} - 1).\mu_0.H$$




الشكل 61.1: التموج النسبي لشدة الحقل المغنطيسي بسبب الحقول التائها (الضالة) (stray fields) من أجل لفة واحدة. النموذج ثُنائي البعد (2D) لثلاث قيم مُختلفة لنفاذية $(\mu_r = 1)$ (بدون وجود النواة) و $(\mu_r = 100)$ و $(\mu_r = 1000)$ المُركبات المماسية لكثافة التدفق المغنطيسية تظهر على طول المُحيط المتوسط للنواة [?].

لذا من الأفضل أن يلتف الملف (الوشيعة) الثانوية قريبة من السطح (مُباشرةً على العينة) لكي يُقلل تأثير التدفق الجوي بين الوشيعة و العينة و الملف الأولي فوق الملف الثانوي ، وبذلك نُقلل الحقول التائها ( الغير المُنتظمة) [6].



الشكل 62.1: أمثلة على بعض ترتيبات اللف المُجربة. [?].

## 20.1 الضياعات المغنطيسية

إن الضياعات في المواد المغنطيسية اللينة تُصنف: كحلقات بطاء، تيارات فوكو، الضياعات الفائضة.

إن التيار المُستمر لا يولد ضياعات لنواة لأنه تيار ثابت مع الزمن من حيث الشدة والاتجاه حيث يكون تواتره معدوم، أما في حالة التيار المتناوب فيولد ضياعات لنواة لأنه تيار تتغير فيه الشدة والتواتر مع الزمن، أي تتغير جهته مرتين في كُل دور حيث يكون التواتر غير معدوم [4].

حيث إن الضياعات المغنطيسية تزداد بزدياد التواتر و التحريض المغنطيسي و ثخانة الصفيحة، في حين تنقص بزيادة كثافة المادة و المقاومة النوعية الكهربائية.

<u>حلقة البطاء:</u>

تتناسب مساحة الحلقة مع العمل الذي يجب القيام به حتى نحصل على حلقة بطاء كاملة، وبما أن هذا العمل موجب فإنهُ يُصرف على شكل حرارة داخل المادة و يُمكن أن ينتج عنهُ تسخين مُضر بها [?]. حيث يزداد عرض حلقة البطاء

بزدياد الحقل القاهر الذي تُسببهُ العيوب (شوائب – رواسب – تشوهات – عيوب بلورية أُخرى) [?] ، وبالتالي تزداد الضياعات المغنطيسية.

تيارات فوكو: تنشأ ضياعات تيارات فوكو داخل الجُزيئة بسبب تدفق تيارات فوكو المُتحرضة عن طريق اختلاف الحقل المغنطيسي داخل الحُبيبات [?]. لذلك لا تنشأ تيارات فوكو في حالة التيار المُستمر، و إنما في حالة التيار المتناوب.

ضياعات تيارات فوكو داخل الجُزيئة ترتبط مع تدفق تيارات فوكو بين الحُبيبات بسبب تحطم فلم العزل (insulating film) الذي يُغطي الحُبيبات (المُحيط بالحُبيبات).

إن هذه التيارات تنتشر في الجسم الناقل طاقة حرارية بمفعول جول تؤدي إلى تسخين الجسم [12].

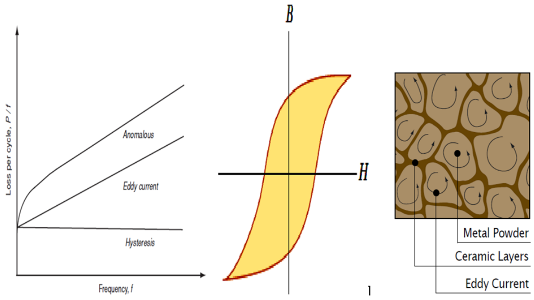
إن لتيارات فوكو مفعولاً ضاراً في النوى الحديدية للمحولات والمولدات، حيث كُلما كانت المقاومة النوعية للنوى الحديدية أصغر كُلما زادت الضياعات بسبب تيارات فوكو [12].

فإذا اعتبرنا وشيعة تحوي نواة من الحديد ويمر في سلكها تيار متناوب فإن كل منحني مغلق مستويه عمودي على محور الوشيعة يخترق سطحه تدفق متناوب فتصبح النواة مسرحاً لتيارات متحرضة تلف حول محور الوشيعة فتستهلك من استطاعة التيار المار فيها جزءاً يساوي تواتر التيار مضروباً بحجم النواة وبمساحة حلقة البطاء فيها، وتذهب هذه الطاقة هدراً إلى تسخين النواة وفي هذا مافيه من تبذير وأذى [12].

ولهذا تُصنع نوى الوشائع من صفائح رقيقة أو قبضان دقيقة موازية لمحور الوشيعة وكل منها مفصول عن الآخر بطبقة عازلة تمنع انغلاق هذه التيارات. هذا وكثيراً ما يلجأ في أجهزة الهاتف والراديو إلى صنع النوى الحديدية من جسيمات مكرونية من الحديد الغروي معجونة في كتلة من الباكيليت (صمغ عازل يتصلب بالجفاف)، وفي هذه النوى يتضاءل خسران الطاقة إلى حد بعيد، لكن النفوذية المغنطيسية لهذا المعجون تصبح أصغر من نفوذية الحديد بكثير [12].

الضياعات الفائضة:

الضياعات الفائضة سببها عن طريق غير انتظام (تماثل) الحُبيبات عكس عملية المغنطة (non–uniformity of the grain reverse magnetic process)، و بسبب حركة جدران بلوخ [?].



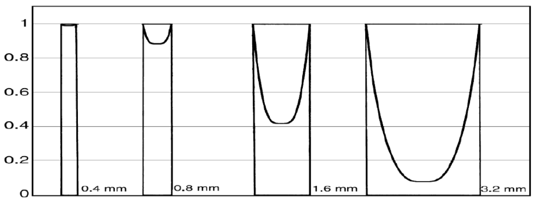

الشكل 63.1: (a) الخسارة لكل حلقة بدلالة التواتر (b) توسع حلقة البطاء (c) ضياعات تيارات فوكو

## 21.1 أثر القشرة

عندما الجسم يُعرض لحقل متناوب، سوف تتولد تيارات فوكو والتي تحجب جزئياً الجسم الداخلي من الحقل. ولذلك القيمة H و بالتالي B داخل الجسم يُمكن أن تكون أقل بكثير من القيمة على السطح، هذه الظاهرة تُسمى أثر القشرة (skin effect). والتي تحصر التدفق على الطبقات السطحية للجسم من أجل التواترات (الترددات) العالية. هذا التأثير يُمكن أن يكون قوي جداً في المادة مثل: صفائح المحولات الفولاذية في التواترات الكهربائية العادية $(50-60\mathrm{HZ})$ ، والتي تُعتبر عادةً مُنخفضة [2].

من أجل أن نقلل من ضياعات تيارات فوكو، نعمل على استخدام صفائح فولاذية رقيقة معزولة عن بعضها.

إن الشكل () يُظهر كثافة التدفق B في مركز الصفيحة الفولاذية للمحول و تحتوي على $(3.5\%\mathrm{Si})$ بدلالة السماكات (الثخانات) المُختلفة.




الشكل 64.1: السعة المحسوبة للتدفق المتناوب لصفائح الفولاذية للمحول من أجل سماكات مُختلفة كجزء من قيمة السطح. الحسابات من أجل تواتر (60 (HZ و عمق الإختراق (0.5 (mm [2].

إن عمق الإختراق (عمق القشرة) (skin) (depth : هي المسافة من سطح المادة أي الحقل المغنطيسي المُضمحل (decayed) إلى (1/e) من قيمة السطح [?]. هذا يعني أن الحقل يدخل المادة الناقلة كهربائياً وهو محصور ضمن الطبقة السطحية لتلك المادة. إن عمق الإختراق يُعطى بالعلاقة التالية [2]:

$$\delta = 5030\sqrt{\frac{\rho}{\mu.f}}$$

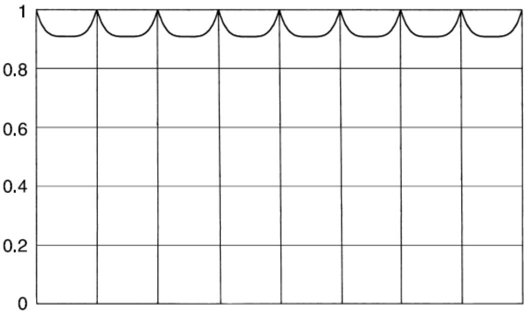
حيث يُلاحظ من مُعادلة عمق الإختراق أنهُ من أجل زيادة هذا العمق نعمل على زيادة المقاومة النوعية الكهربائية للمادة وتخفيض تواتر التيار المتناوب.

يفضل استعمال التيار المستمر لأن التيار المستمر يتغلغل إلى أعماق أكبر في المادة (بالمقارنة بالتيار المتناوب). في المواد الفيرومغنطيسية، يتغلغل الحقل المغنطيسي المتولد بتيار مستمر عموماً في كامل المقطع العرضي للقطعة [?].

حيث إن التيار المستمر هو تيار ثابت مع الزمن من حيث الشدة والاتجاه وبالتالي تواتره معدوم ولذلك يتغلغل إلى أعماق أكبر في المادة، مثل التيار الذي تولده البطاريات أو وحدات التغذية المستمرة. يتدفق التيار من القطب الموجب لوحدة التغذية في الدارة.

من أجل السماكة (0.4 (mm تكون كثافة التدفق 100%، من أجل السماكة (0.8 (mm تكون كثافة التدفق عند الأطراف 100%، وتنخفض في المنتصف، و هكذا من أجل السماكات الأخرى (1.6 - 3.2 (mm حيث تنخفض كثافة التدفق عند المنتصف بزيادة سماكة الصفيحة [2].

لذلك كما ذُكر سابقاً نعمل على استخدام صفائح رقيقة وكل منها مفصول عن الآخر بطبقة عازلة، كما في الشكل():




الشكل 65.1: سعة التدفق النسبية المحسوبة من تكديس الصفائح المعزولة، كُل منها سماكته (0.75 (mm وبنفس الشروط الشكل السابق () [2].

# قائمة الأشكال


1.1 دوران الإلكترون حول نواة الذرة. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 1
2.1 (a) الكترونان جهة دورانهما مُتعاكسة. (b) الكترونان جهة دورانهما واحدة [13]. . . . . . . . 2
3.1 الطواعية المغنطيسية بدلالة درجة الحرارة للمواد ذات المغنطة العكسية [?]. . . . . . . . . . 2
4.1 تفرق خطوط الحقل المغنطيسي عند وضع قطعة من مادة ذات مغنطة عكسية. . . . . . . . 3
5.1 (a) الطواعية المغنطيسية بدلالة درجة الحرارة للمواد المغنطيسية المُسايرة. (b) اتجاه العزوم المغنطيسية في المواد المُسايرة [?]. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 3
6.1 تجميع خطوط الحقل المغنطيسي عند وضع قطعة من مادة ذات مغنطة مُسايرة. . . . . . . . 4
7.1 درجة حرارة نييل ودرجة حرارة كوري للمواد المغنطيسية اللاحديدية [8]. . . . . . . . . . 4
8.1 (a) الطواعية المغنطيسية بدلالة درجة الحرارة للمواد المغنطيسية اللاحديدية. (b) اتجاه العزوم المغنطيسية في المواد ذات المغنطة اللاحديدية. (c) توزع سبينات الأيونات في البنية البلورية ل MnO . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 4
9.1 (a) الطواعية المغنطيسية بدلالة درجة الحرارة. (b) اصطفاف العزوم المغنطيسية في صورة مُضادة للتوازن. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 5
10.1 مُنحني (Bethe − Slater) الذي هو تكامل التبادل A بدلالة نسبة المسافة بين الذرات (a) على نصف قطر المدار المملوء بشكل غير كامل (r) (incompletely filled shell) [8] . . . 5
11.1 (a) الطواعية المغنطيسية بدلالة درجة الحرارة للمواد الفيرومغنطيسية (المغنطة الحديدية). (b) اتجاه العزوم المغنطيسية في المواد الفيرومغنطيسية [?]. . . . . . . . . . . . . . . . 6
12.1 الخواص الرئيسية للمواد الفيرومغنطيسية [8]. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 6
13.1 تجميع وتكثيف خطوط الحقل عند وضع قطعة من مادة فيرومغنطيسية على شكل قضيب أمام حقل مغنطيسي . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 7
14.1 تراكيب المناطق الفيرومغنطيسية: (a) بلورة أُحادية. (b) نموذج مُتعدد البلورات. تُمثل الأسهم إتجاه المغنطة. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 7
15.1 جدار بلوخ بين منطقتين مغنطيسيتين لمادة فيرومغنطيسية. . . . . . . . . . . . . . . 7
16.1 تمغنط مادة فيرومغنطيسية: (a) غير مُتمغنطة. (b) مُتمغنطة بحركة جدار المنطقة المغنطيسية (جدران بلوخ). (c) مُتمغنطة بدوران المنطقة المغنطيسية. . . . . . . . . . . . . . . 8
17.1 (a) حلقة البطاء لمادة مغنطيسية قاسية، (b) حلقة البطاء لمادة مغنطيسية لينة. . . . . . . . 8
18.1 الحقل القاهر بدلالة استقطابية الإشباع للمواد المغنطيسية (اللينة ونصف القاسية والقاسية) [8]. . 9
19.1 مُنحني المغنطة الإبتدائي لبعض المواد: (a) المغنطة بدلالة الحقل المغنطيسي. (b) كثافة التدفق المغنطيسي بدلالة الحقل المغنطيسي [11]. . . . . . . . . . . . . . . . . . . 9
20.1 (a) المجالات المغنطيسية مُرتبة بشكل عشوائي. (b) المجالات المغنطيسية أُصطفت باتجاه مُحدد [?]. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 10
21.1 حركة جدران بلوخ و دورانها. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 10
22.1 حلقة البطاء . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 11

23.1 (a) حلقة البطاء عند تيار مُستمر و تيار جيبي (تواترات مُختلفة). (b) أشكال حلقات البطاء: المُستطيلة و المُسطحة و الدائرية. (c) تغير التدفق المغنطيسي لتيار جيبي وتيار مُستمر نبضي للحلقات المُستطيلة و المُسطحة. [?] . . . . . 11
24.1 إن أشكال حلقات البطاء توصف عن طريق نسبة $\frac{B_R}{B_M}$. . . . . 11
25.1 (a) مُنحني إزالة المغنطة بعكس تيار المغنطة عدة مرات مع إنقاص قيمة التيارفي كُل مرة عن سابقتها. (b) تحول المادة الفيرومغنطيسية إلى مادة ذات مغنطة مُسايرة عند رفع درجة الحرارة إلى فوق درجة كوري. . . . . . 12
26.1 الشكل : نماذج إنقلاب في الجسيمات ذات الشكل البيضوي . (a) دوران متماسك. (b) التفاف. (c) ثني. (d) انتشار (سلسلة كرات). (e) تأثير الدومينو [2]. . . . . . 13
27.1 (a) أنواع الإنزتروبية المغنطيسية في الجُزيئات. (b) الإنزتروبية المغنطيسية. . . . . . 13
28.1 يُبين الشكل عكس المحور الصعب و عكس المحور السهل . . . . . 13
29.1 مُنحنيات المغنطة للبلورات الوحيدة (a) للحديد (b) للنيكل . . . . . 14
30.1 1. . . . . . 14
31.1 (a) ملف حلزوني حلقي. (b) خطوط الحقل المغنطيسي. . . . . . 15
32.1 (أ) تركيب المحول. (ب) رمز المحول. . . . . . 15
33.1 (a) حلقة أمبير. (b) مسار مغلق يُحيط بسلك أسطواني. . . . . . 16
34.1 مُخطط حديد – كربون . . . . . 17
35.1 .مُخطط حديد – نيكل . . . . . 18
36.1 محتوى النيكل بدلالة البرامترات المُختلفة لخليطة حديد – نيكل [8]. . . . . . 19
37.1 تغير في البرامترات المغنطيسية عند إضافة الموليبدينيوم بنسب مُختلفة لخليطة $78.5\%Ni - Fe$ (Bozorth 1951). . . . . . 19
38.1 حلقات البطاء لخليطة $65\%Ni - 35\%Fe$ بالتلدين بوجود حقل مغنطيسي وبدونه (Bozorth 1951) [?]. . . . . . 20
39.1 (a) الانخلاع في الشبكة البلورية. (b) و انتقاله عبر الشبكة [?]. . . . . . 21
40.1 أشكال الانخلاعات الشبكية [?]. . . . . . 21
41.1 البنية الميكروية الدقيقة للفولاذ قليل الكربون: (a) حُبيبة الفيريت (الخطوط الغليظة)، والقطاعات (الخطوط الرفيعة) X250 . (b) الوحدات الفسيفسائية لحبيبة الفيريت، و حدود القطاعات X16000 [?]. . . . . . 22
42.1 توضع الذرات داخل وعلى حدود الحبيبات [?]. . . . . . 22
43.1 يُبين الشكل تأثير الشوائب: (1) الأوكسجين. (2) الكبريت. (3) الفوسفور: على كلا من (a) الحقل القاهر و (b) النفاذية المغنطيسية. للخليطة $Fe50\%Ni$ [1]. (c) تأثير نسبة الكربون على مُنحني المغنطة الإبتدائي للحديد [8]. . . . . . 23
44.1 تأثير درجة حرارة التلبيد على محتوى الأوكسجين [?]. . . . . . 23
45.1 تأثير الكربون و الفوسفور على الخواص المغنطيسية [?]. . . . . . 24
46.1 تأثير جو النتروجين على محتوى الأوكسجين في المادة [?]. . . . . . 24
47.1 (a) الحقل القاهر كتابع للجزء المحصور (intercept) لحجم الحُبيبات المتوسط. (b) النفاذية العُظمى كتابع للجزء المحصور (intercept) لحجم الحُبيبات المتوسط [10]. . . . . . 25
48.1 تأثير الكثافة على التحريض المغنطيسي في عينة من الحديد الملبد [?]. . . . . . 25
49.1 الخواص المغنطيسية للحديد 1– بعد عملية التشغيل. 2– بعد تلدين العينة عند درجة حرارة $845°C$. 3– بعد تلدين العينة عند درجة حرارة $1120°C$ [?]. . . . . . 26
50.1 الخواص المغنطيسية لخلائط الحديد على شكل صفائح رقيقة و أنوية مقصوصة (مقطوعة) و أنوية اللفائف الشريطية [?]. . . . . . 27
51.1 الأنواع المُختلفة لأنوية المحولات: (a) صفائح رقيقة (lamination). (b) أنوية المقصوصة (المقطوعة) (cut cores). (c) أنوية حلقية. . . . . . 27
52.1 أمثلة عن الأنوية الحلقية مُحضرة عن طريق (a) لف شريط. (b) طبقات من صفائح رقيقة مُتراصة. (c) البودرة المغنطيسية [8]. . . . . . 28

53.1 نسبة $\frac{L_M}{L}$ بدلالة نسبة $\frac{D_e}{D_i}$ [?]. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 28
54.1 توزيع كثافة التدفق مُحدد بشكل تجريبي في العينات الحلقية للإرتفاعات والأقطار الداخلة المُختلفة (العينات ذات الأبعاد $(D_i \times D_e \times h$ [8]. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 29
55.1 مُقارنة المواد المغنطيسية بوجود فجوة هوائية وبدونها [?]. . . . . . . . . . . . . . . . 30
56.1 نسبة الحقل المغنطيسي المتوسط على الحقل المغنطيسي في مركز المقطع للحلقات ذات المقطع الدائري أو المُستطيل من أجل نسب مختلفة من عرض النصف القطر على القطر المتوسط للحلقة [?] [6]. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 30
57.1 (a) المقطع العرضي لحلقة ذو مقطع مُستطيلي. (b) المقطع العرضي لحلقة ذو مقطع دائري [?]. 31
58.1 نسب مختلفة من عرض النصف القطر على القطر المتوسط للحلقة من أجل نسبة الحقل المغنطيسي المتوسط على الحقل المغنطيسي في مركز المقطع، للحلقات ذات المقطع الدائري (المُنحني السُفلي) أو المُستطيل (المُنحني العلوي) [?]. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 32
59.1 النسبة المئوية للخطأ في تحديد نسبة الحقل المغنطيسي المتوسط على الحقل المغنطيسي في مركز المقطع للحلقات ذات المقطع الدائري أو المُستطيل من أجل النسب المُختلفة من عرض النصف القطر width radial على القطر المتوسط للحلقة [?]. . . . . . . . . . . . . . . . . 32
60.1 تغير كثافة التدفق المغنطيسي مع تغير المسافة عن محور الحلقة، من أجل ثلاثة قيم مُختلفة لتيار المغنطيسي (المغنطة) [?]. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 33
61.1 التموج النسبي لشدة الحقل المغنطيسي بسبب الحقول التائها (الضالة) (stray) (fields من أجل لفة واحدة. النموذج ثُنائي البعد (2D) لثلاث قيم مُختلفة لنفاذية $(\mu_r = 1)$ (بدون وجود النواة) و $(\mu_r = 100)$ و $(\mu_r = 1000)$ المُركبات المماسية لكثافة التدفق المغنطيسية تظهر على طول المُحيط المتوسط للنواة [?]. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 34
62.1 أمثلة على بعض ترتيبات اللف المُجربة. [?]. . . . . . . . . . . . . . . . . . 34
63.1 (a) الخسارة لكل حلقة بدلالة التواتر (b) توسع حلقة البطاء (c) ضياعات تيارات فوكو . . . . 35
64.1 السعة المحسوبة للتدفق المتناوب لصفائح الفولاذية للمحول من أجل سماكات مُختلفة كجزء من قيمة السطح. الحسابات من أجل تواتر (60 (HZ و عمق الإختراق (0.5 (mm [2]. . . . . . . 36
65.1 سعة التدفق النسبية المحسوبة من تكديس الصفائح المعزولة، كُل منها سماكته (0.75 (mm وبنفس الشروط الشكل السابق () [2]. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 36

# قائمة الجداول

# المراجع العلميَّة


[1]

[2] 1. INTRODUCTION TO MAGNETIC MATERIALS, volume 1. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. All rights reserved. Published simultaneously in Canada, 2009.

[3] Robert C.O'handley. Modern magnetic materials: principles and applications. John Wiley & Sons, Canada, 2000.

[4] Marcel Dekker. Magnetic materials and their characteristics. 1, page 1, 2004.

[5] DERYA ERDEM. Microwave sintering and characterizaton of soft magnetic powder metallurgical ni-fe alloys. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY, page 1, 2011.

[6] Raymond L. Sanford and Irvin L. Cooter. Basic Magnetic Quantities and the Measurement of the Magnetic Properties of Materials. U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE NATIONAL BUREAU OF STANDARDS, 1962.

[7] Dr. Carmen-Gabriela Stefanita. From bulk to nano, volume 117 of Springer Series in Materials Science. Springer Berlin Heidelberg, 2008.

[8] Slawomir Tumanski. HA N D B O O K O F MAGNETIC MEASUREMENTS. Warsaw University of Technology, Poland, 2011.

[9] G. S. Upadhyaya. Powder metallurgy technology. Cambridge international science publishing, 2002.

[10] B. Commandeur J.J. Dunkley H. Harada V. Behrens, P. Beiss. Powder Metallurgy Data, volume 2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003.

[11] بيداء الأشقر. طرق تحليل و توصيف المواد. الاختبارات اللاإتلافية, page 75, 2000.

[12] الدكتور: أدهم السمان. الكهرطيسية. جامعة دمشق, 1982 - 1983.

[13] محمد بسام بالو محمد أديب طالو علي الفقير, محمد نوفل أبو علي. الفيزياء. وزارة التربية, 1999 - 2000.

[14] يرماكوف فيازنيكوف. استعمال منتجات ميتالورجيا المساحيق في الصناعة. دار مير للطباعة و النشر.